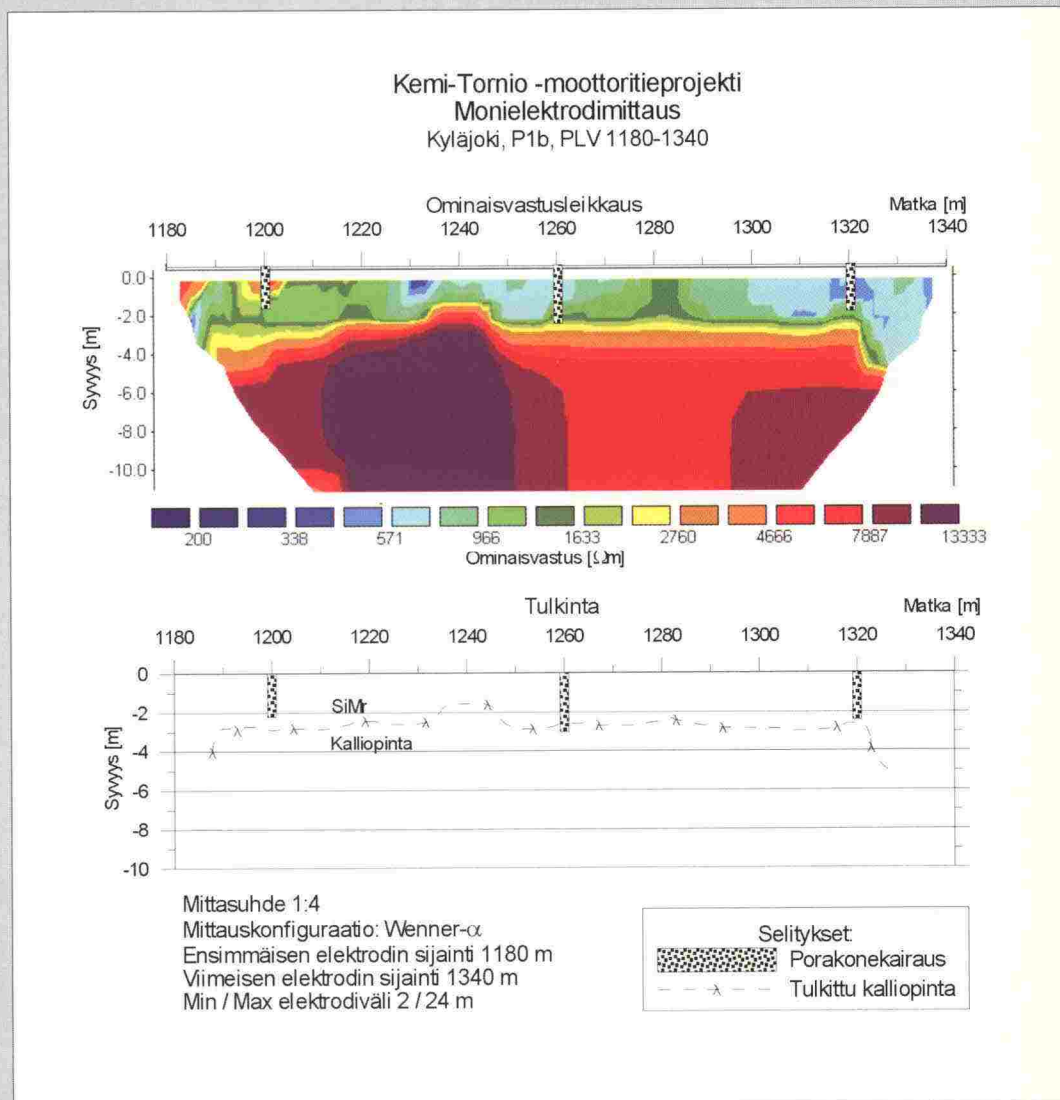


Sähköisen monielektrodimenetelmän käyttö maa- ja kallioperän tutkimuksissa



Tielaitoksen
selvityksiä

38/1999

Oulu 1999

Tielaitos
Tuotannon T&K

Tielaitoksen selvityksiä
38/1999

Mika Silvast

**Sähköisen monielektrodimenetelmän
käyttö maa- ja kallioperän tutkimuksissa**

Tielaitos
Tuotannon T&K

Oulu 1999

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-577-8
TIEL 3200581

Oy Edita Ab
Helsinki 1999

Julkaisua myy:
Tielaitos, julkaisumyynti
Puhelin 0204 44 2053
Faksi 0204 44 2652
S-posti elsa.juntunen@tieh.fi



Tielaitos
TUOTANNON T&K
Veteraaninkatu
PL 555
90101 OULU
Puhelinvaihde 0204 44 158

SILVAST, Mika: Sähköisen monielektrodimenetelmän käyttö maa- ja kallioperän tutkimuksissa. Oulu 1999. Tielaitos, Tuotannon T&K, Tielaitoksen selvityksiä 38/1999, 44 s. + liitt. ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-577-8, TIEL 3200581

Asiasanat Maavastusluotaus, pohjatutkimus, monielektrodimenetelmä, geofysikaaliset menetelmät

Aiheluokka 61

TIIVISTELMÄ

Tässä selvityksessä on tutkittu sähköisen monielektrodimenetelmän (jatkuva maavastusluotaus) soveltuvuutta maa- ja kallioperätutkimuksiin. Maastomittaukset on suoritettu Tielaitoksen kalustolla (ABEM LUND Imaging System). Mittauksia on tehty useilla Tielaitoksen tierakennuskohteilla, lähinnä pehmeikköjen paksuuden ja maaperän ominaisuuksien tutkimuksissa. Mittaustulosten tulkinnessa on käytetty RES2DINV-inversio-ohjelmaa. Kenttämittauksista laskettujen inversiomallien referenssitietoina on käytetty maaperäkairauksia ja -näytteitä. Menetelmä soveltuu etenkin alueille, joilla maatutkaa ei voida käyttää maaperän suuren sähkönjohtavuuden vuoksi.

Monielektrodimittausten tuloksia voidaan hyödyntää monissa geoteknisissä tutkimuksissa. Menetelmällä voidaan tutkia esimerkiksi pehmeikköjen savi- ja silttikerroksien paksuuksia sekä kalliopinnan syvyyttä ja laatua. Menetelmä mahdollistaa pohjavesiesiintymien laajuuden kartoituksen ja veden laadun arvioinnin, sora-alueiden materiaalien kartoituksen ja niillä esiintyvien silttisten ainesten paikantamisen, saastuneiden maa-alueiden kartoituksen ja saasteiden kulkeutumisen seurannan maaperässä. Lisäksi menetelmää voidaan käyttää maa- ja betonipatojen vuototutkimuksissa, vuotavien putkien paikantamisessa, arkeologisissa tutkimuksissa ja vedenalaisissa tutkimuksissa, kuten meren- ja joenpohjan pehmeikköjen tutkimuksissa.

SILVAST, Mika: Sähköisten monielektrodimittausten käyttö maa- ja kallioperän tutkimuksissa. [Use of electrical imaging in ground and bedrock surveys.]

Key words Continuous vertical electrical sounding, electrical imaging

ABSTRACT

This report is a study about electrical imaging in ground and rock surveys. Surveys have been made with ABEM LUND multielectrode system, which is owned by Finnish national road administration. The measurements have been done in many road construction areas in Finland. The aims of those measurements have been usually to measure the thickness of the clay layer and the quality of the material.

The resistivity data has been interpreted with RES2DINV inversion program. Drillings and sample data has been used as a reference data in interpretations. Electrical imaging is suitable method especially in areas where GPR is unusable cause of high conductivity of soil. The electrical imaging is useful in variety of geotechnical and civil engineering investigations such as road and railroad constructions, raw material and groundwater prospecting, groundwater quality control etc. With a reliable reference data achieved resistivity models are very accurate.

ALKUSANAT

Ainetta rikkomattomat geofysikaaliset maaperän tutkimusmenetelmät ovat nopeutensa ja halpuutensa vuoksi yleistyneet viime vuosina. Esimerkkinä voidaan pitää maatutkaa, jonka suosio on parantuneiden signaalinkäsittelymenetelmien myötä kasvanut voimakkaasti. Maatutka ei kuitenkaan sovellu käytettäväksi kaikissa maaperäolosuhteisissa, kuten esimerkiksi savikko-alueilla.

Tuotannon T&K:n ja Lapin tiepiirin vetämässä ns. MISU-projektissa selvitettiin uusien mittaus- ja tutkimusmenetelmien kelpoisuutta ja käyttöä rakenteen parantamisen suunnittelussa. Siinä yhteydessä tuli esille sähköinen monielektrodimittaus (jatkuva maavastusluotaus eli DC-luotaus (Direct Current)). Monielektrodimittaus on sähköinen geofysikaalinen maaperän tutkimusmenetelmä, joka soveltuu käytettäväksi mm. kohteissa, joihin maatutka ei sovellu.

Monielektrodimenetelmän käyttökelpoisuuden tutkiminen eriytettiin omaksi tuotannon T&K:n rahoittamaksi projektiksi. Tutkimuksen on tehnyt geofysiikan yo. Mika Silvast Pro gradu-tutkielmana Oulun yliopiston luonnontieteellisen tiedekunnan geotieteiden laitoksen geofysiikan osastolle. Hän on myös kirjoittanut tämän raportin, jonka tarkoitus on kuvata maavastusmittauksen periaatteet ja käyttötavat erityisesti Tielaitosta silmälläpitäen. Tutkimuksen kenttäaineistona on käytetty mm. Turun ja Lapin tiepiirien sekä tuotannon omien toimeksiantojen yhteydessä syntynyttä mittausaineistoa.

Tielaitoksen tuotannon konsultoinnilla on käytössään raportissa esitelty ja tutkimuksessa käytetty monielektrodimittauskalusto, jonka käytöstä vastaa geologi Kari Lappalainen konsultoinnin Etelä-Suomen yksikössä.

Oulussa marraskuussa 1999

Seppo Salmenkaita
Tuotannon T&K

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
2	YLEISTÄ	11
2.1	Geofysikaalisesta tutkimuksesta	11
2.2	Maa- ja kallioperän sähkönjohtavuuteen vaikuttavista tekijöistä	12
3	SÄHKÖISTEN MITTAUSTEN TEORIAA	15
3.1	Historiaa	15
3.2	Sähköisten mittausten fysikaalinen perusta ja mittausperiaate	16
4	SÄHKÖINEN MONIELEKTRODIMENETELMÄ	21
4.1	Taustaa	21
4.2	Mittausmenetelmä	21
4.3	Maastomittausten suorittamisen edellytykset	24
4.4	Mittausten suoritus	24
4.5	Mittausnopeus ja resoluutio	26
4.6	Mittautulosten esikäsittely	27
4.7	Mittautulosten esittäminen	28
4.8	Tulosten tulkinta	29
4.9	Eri elektrodijärjestelmien vertailua	32
4.10	Mittaus- ja tulkintatuloksiin vaikuttavat tekijät	35
5	SOVELLUSKOhteITA	38
5.1	Yleistä	38
5.2	Tielaitoksen tutkimuksia	38
5.3	Pohjatutkimukset	38
5.4	Kallioperätutkimukset	38
5.5	Pohjavesitutkimukset	39
5.6	Ympäristötutkimukset	39
5.7	Erikoistutkimukset	39
5.8	Tulevaisuus	40
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	41
7	KIRJALLISUUS	43
8	LIITTEET	47

1 JOHDANTO

Lapin tiepiirissä on käytetty 1980-luvun puolivälistä lähtien rutiininomaisesti erilaisia geofysikaalisia mittausten menetelmiä teiden suunnitteluhankkeissa ja maa-ainestutkimuksissa sekä maatumkatekniikan kehittyttyä myös rakenteen parantamiskohteissa ja päällystystöiden suunnittelussa. Maatumkatekniikan tehokkuuden vuoksi on muiden geofysikaalisten mittausten menetelmien, kuten seismisen refraktioluotauksen ja maavastusluotauksen käyttö jäänyt viime aikoina vähäiseksi.

Maatumkaluotauksen ongelmana on kuitenkin se, ettei maatumkasignaali läpäise hyvin sähköä johtavia maalajeja. Tämän vuoksi etenkin rannikoiden savi- ja silttialueilla maatumkan avulla ei kyetä saamaan kaikkea tarvittavaa tietoa pohjamaan rakenteesta. Näiden ongelmien ratkaisuun soveltuvat ns. tasavirtaluotaustekniikat erinomaisesti. Mittaustekniikan kehittymisen myötä markkinoille on tullut viime vuosina tehokkaita sähköisiä monielektrodimitauskalustoja. Niillä voidaan maatumkaluotauksen tapaan kerätä suhteellisen nopeasti jatkuvaa tietoa pohjamaan sähköisestä rakenteesta. Mittaustuloksista voidaan inversioalgoritmeilla laskea sähköinen rakennemalli, josta referenssitietojen perusteella voidaan muodostaa inversiomalli pohjamaan geologisesta rakenteesta. Monielektrodimitauksen syvyysulottuvuus on savikoillakin useita kymmeniä metrejä.

Lapin tiepiirin konsultoinnin maatumkaryhmä vuokrasi kesällä 1996 uuden sähköisen monielektrodikaluston koekäyttöön ja testien rohkaisemana piiriin käyttöön hankittiin vuonna 1997 oma kalusto. Kesällä 1997 tutkittiin monielektrodimenetelmän soveltuvuutta mm. maakerrosten paksuuden ja laadun sekä kalliopinnan syvyyden mittauksiin niissä Kemi - Tornio - moottoritiesuunnitteluprojektin kohteissa, joissa maatumkaa ei voitu käyttää. Vuosien 1998 ja 1999 aikana mittauksia suoritettiin myös muissa kohteissa eri puolilla Suomea.

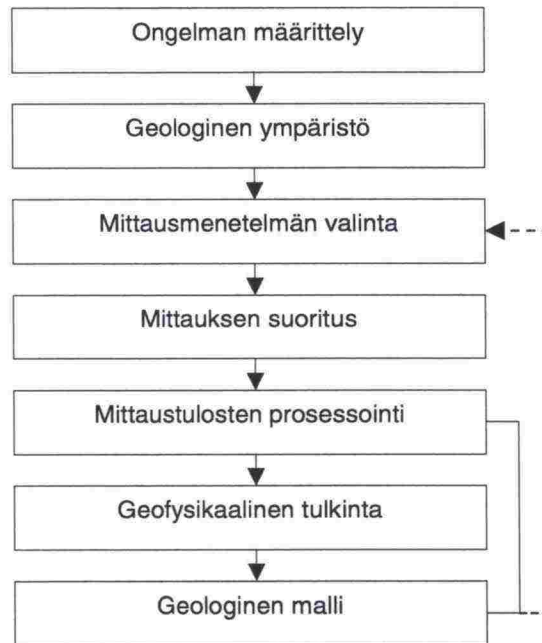
Monielektrodimitausten tuloksia voidaan hyödyntää monissa geoteknisissä tutkimuksissa. Tekniikan avulla voidaan tutkia esimerkiksi pehmeikköjen savi- ja silttikerroksien paksuuksia, kalliopinnan syvyyttä ja laatua. Menetelmä mahdollistaa pohjavesiesiintymien laajuuden kartoituksen ja veden laadun arvioinnin, sora-alueiden materiaalien kartoituksen ja niillä esiintyvien silttisten aineiden paikantamisen, saastuneiden maa-alueiden kartoituksen ja saasteiden kulkeutumisen seurannan maaperässä. Lisäksi menetelmää voidaan käyttää maa- ja betonipatojen vuototutkimuksissa, vuotavien putkien paikantamisessa, arkeologisissa tutkimuksissa ja vedenalaisissa tutkimuksissa, kuten meren- ja joenpohjan pehmeikköjen tutkimuksissa.

Tämä selvitys liittyy pohjatutkimusten kehittämiseen tielaitoksen tutkimuksissa ja se on Tielaitoksen konsultoinnin rahoittama. Selvityksessä esitellään mittausten teoriaa sekä suorittamista sähköisellä monielektrodikalustolla. Tässä julkaisussa esitetyt asiat löytyvät laajemmin esitettynä Oulun yliopiston luonnontieteellisen tiedekunnan geotieteiden laitoksen geofysiikan osastolle syksyllä 1999 jätetystä Pro gradu -tutkielmasta: Sähköiset monielektrodimittaukset maa- ja kallioperätutkimuksissa.

2 YLEISTÄ

2.1 Geofysikaalisesta tutkimuksesta

Geofysikaalisen tutkimuksen tehtävänä on tuoda esiin tietoja tutkittavan kohteen geologista ominaisuuksista. Tämä tapahtuu mittaamalla yhtä tai useampia fysikaalista ominaisuutta tutkittavasta kohteesta ja "suhteuttamalla ne geologisiin tietoihin" vertailutietojen avulla (Dahlin 1993). Geofysikaalinen tutkimus sisältää useita vaiheita kuten alla oleva *kuva 1* esittää.



Kuva 1. Geofysikaalisen tutkimuksen periaate. Muokattu Dahlinin (1993) kuvasta.

Ensimmäinen vaihe geofysikaalisessa tutkimuksessa on määritellä ongelma tai tehtävä. On selvítettävä kiinnostuksen kohde ja syy. Ajalliset ja ekonomiset varat on myös otettava huomioon. Tämän jälkeen täytyy muodostaa alueen alustava geologinen malli käyttämällä lähteinä arkistomateriaalia kuten geologisia ja muita karttoja, ilmakuvia, satelliittikuvia, kairaustietoja, raportteja ja muita tutkimuksia. Alustavan geologisen mallin saadaan käsitys alueen geologisesta ympäristöstä. Mallin avulla voidaan valita tutkimukseen parhaiten sopiva geofysikaalinen tutkimusmenetelmä tai –menetelmät. (Dahlin 1993.)

Seuraavana vaiheena on mittausten suoritus suunnitellulla menetelmällä ja tutkimussuunnitelmalla. Jos suunnitelma on onnistunut, mittausten suoritus sujuu yleensä ongelmitta. Odottamattomia ongelmia voi kuitenkin ilmentua,

niitä ovat esimerkiksi ihmisten rakentamat sekä luonnolliset häiriölähteet. Nämä ongelmat voivat aiheuttaa muutoksia mittaussuunnitelmiin. (Dahlin 1993.)

Mitattu aineisto voidaan prosessoida monella eri tavalla riippuen mittausmenetelmästä. Prosessointimenetelmiä ovat esimerkiksi häiriöllisten mittaustulosten poisto sekä topografia- ja geometriset korjaukset. Prosessoitua mittaussaineistoa käytetään geofysikaalisen mallin muodostamisessa tulkinassa. Tulkintaa, missä maa- ja kallioperän rakennetta kuvaava geofysikaalinen malli saadaan laskettua mittaussaineistosta, kutsutaan inversioksi. Esimerkiksi sähköisissä mittauksissa tuloksista saadaan laskettua malli, joka koostuu eri paksuisista ja erilaisen ominaisvastuksen omaavista kerroksista. (Dahlin 1993.)

Viimeisessä vaiheessa tehdään geofysikaaliselle mallille geologinen tulkinta. Tulkinnassa voidaan käyttää vertailutietona muita geofysikaalisia mittauksia tai kairautietoja. Näin saadaan varmistettua tulkinnan oikeellisuus. Jos geofysikaalinen malli ei vastaa odotettua geologista mallia, yritetään tulkintaa saada tarkemmaksi tulkintaparametreja varioimalla. Pahimmassa tapauksessa voidaan joutua suorittamaan mittaukset uudelleen toisella mittausmenetelmällä. (Dahlin 1993.)

Geofysikaaliselle tutkimukselle luonteenomaisia seikkoja ovat seuraavat: 1) Geofysikaalisten mittausten mittauspisteiden tiheys on yleensä suhteellisen harva, johtuen mittausten kalleudesta tai hitaudesta. 2) Mittausaineisto on yleensä mitattu maan pinnalta, ilmasta tai kairanreiästä, kolmiulotteisen rakenteen poikki. 3) Tutkimukset on suunniteltu yleensä yksi-, kaksi- tai kolmi-ulotteista tulkintaa varten. Yksiulotteisia tutkimuksia kutsutaan luotauksiksi ja niillä saadaan tietoa maan kerroksista pystysuunnassa. Kaksiulotteisissa tutkimuksissa mitataan pysty- ja vaakamuutoksia mittaustulosten suunnassa, profiileina. Kolmiulotteisissa tutkimuksissa mittaukset suoritetaan alueellisesti, maan päällä x ja y suunnissa ja syvyyden z suunnassa. (Oldenburg et al. 1998.)

2.2 Maa- ja kallioperän sähkönjohtavuuteen vaikuttavista tekijöistä

Kvartaariset maaperäkerrostumat peittävät yli 95% Suomen kallioperästä, sisältäen myös veden peittämät alueet. Maakerroksen paksuus vaihtelee yleensä 2-15 metrin välillä. Yleisin maalaji on moreeni, mutta myös soraa, hiekkaa, silttiä ja savea esiintyy yleisesti. Tyypillinen piirre on se, että kaikkia edellä mainittuja maalajeja voidaan löytää suhteellisen pieneltä alueelta. Karkeita maalajeja, kuten soraa ja hiekkaa, voidaan löytää glasifluviaalisista harjuista ja deltamuodostumista. Hienorakeisia ja painuvia maalajeja esiin-

tyy yleensä rannikkoalueilla. Turve peittää noin 30% Suomen pinta-alasta. Erityisesti Pohjois-Suomessa sijaitsee laajoja turve-esiintymiä. Suomen kallioperä on pääosin iältään prekambrista (ikä 1600-2000 milj. vuotta) ja se koostuu pääasiassa graniiteista, granodioriiteista, kvartsidioriiteista ja migmaatiiteista. Liuskeet ja mafiset plutoniset kivet peittävät vähemmän kuin 20% kallioperästä. (Saksa & Korkealaakso 1987.)

Sähköisten ominaisuuksien perusteella kivilajeja ja muodostumia voidaan sekä rajata että tutkia niiden ominaisuuksia. Sähköinen ja geologinen rakenne eivät kuitenkaan aina vastaa toisiaan. Sähkönjohtavuus on eri tekijöiden muodostama monimutkainen kokonaisuus, joten muodostumarajojen erottaminen sähköisesti voi olla vaikeaa. Sähköiset ominaisuudet voivat vaihtua jyrkästi tai vähitellen. Sähköisiä epäjatkuvuuskohtia tai nopean muutoksen alueita ovat maaperän kerrosten rajat, routaraja, pohjavesipinta, irtomaan ja kallion raja, kivilajirajat sekä ehyen ja rapautuneen tai ruhjoutuneen kallion raja. (Heiskanen 1975.)

Sähkönjohtavuusmekanismeja on kolme: elektrolyyttinen, elektroninen ja dielektrinen johtavuus. Elektrolyyttinen johtavuus on lähinnä nestemäisessä materiassa olevien ionien liikkeen aiheuttamaa johtavuutta. Elektronisessa johtavuudessa vapaat elektronit kuljettavat varausta. Dielektrinen johtavuus on puolestaan eristeiden polarisaatiovarausten värähtelystä aiheutuvaa johtavuutta, joka kasvaa taajuuden funktiona. (Reynolds 1997.)

Kallioperän kivilajien ominaisvastoilla on suuri vaihteluväli (30 - 40 000 Ωm) (taulukko 1). Jos mineraalit ovat eristeitä, pääosa kivilajin johtavuudesta aiheutuu huokosten täyttämästä elektrolyytistä ja sen epäpuhtauksista. Kallioperän johtavuutta lisäävät huomattavasti ruhjeet ja rakosysteemit. Paine ja lämpötila vaikuttavat kivilajien ominaisvastukseen siten, että ominaisvastus pienenee tasaisesti lämpötilan ja paineen kasvaessa. (Pernu 1979.)

Maaperän ominaisvastukset voivat vaihdella suurestikin maalajista riippuen (taulukko 1). Maalajit ovat elektrolyyttijohteita ja pohjavesi vaikuttaa niiden ominaisvastukseen. Ominaisvastus pienenee maalajin karkeuden pienentyessä sekä vesipitoisuuden kasvaessa. Suurimmat ominaisvastusarvot on havaittu kuivalla soralla ja karkealla hiekalla (3000 - 30 000 Ωm). Veden kyllästämässä sorassa ja hiekassa ominaisvastus vaihtelee 300 - 2000 Ωm välillä, riippuen aineksen karkeudesta. Pienimmät ominaisvastusarvot ovat savella ja siltillä, erityisesti sulfidisavella ja -siltillä (2-50 Ωm). Moreenin ominaisvastusarvo riippuu kääntäen sen sisältämän hienoaineksen määrästä. (Pernu 1979.)

Veden ominaisvastus on riippuvainen veteen liuenneiden suolojen määrästä (taulukko 1). Pohjaveden ominaisvastus vaihtelee 10 - 100 Ωm :n välillä.

Järvi- ja jokiveden ominaisvastus on kohtalaisen suuri (200-1000 Ωm). Meriveden pieni ominaisvastus (1-10 Ωm) johtuu suhteellisen suuresta suolamäärästä (Pernu 1991). Tästä johtuen maavastusmenetelmä on erityisen käyttökelpoinen tekniikka kartoitettaessa makean ja suolaisen pohjaveden rajapintaa rannikkoalueilla (Loke 1999b).

Teollisuuden saasteiden ominaisvastusarvot riippuvat yhdisteiden koostumuksesta (taulukko 1). Metalleilla (rauta) on erittäin pieni ominaisvastusarvo. Kemikaalit (vahvat elektrolyytit) voivat pienentää pohjaveden ominaisvastusta alle 1 $\Omega\text{m:n}$ jo pieninäkin pitoisuuksina. Toisaalta heikkojen elektrolyyttien (etikkahappo) vaikutus ominaisvastusarvoon on huomattavasti pienempi. Hiilivedyillä (ksyleeni) on tyypillisesti erittäin korkeat ominaisvastusarvot. (Loke 1999b.)

Taulukko 1. Kivilajien, maaperän ja eri kemikaalien ominaisvastusarvojen vaihteluvälejä. (¹Pernu 1991; ²Saksa & Korkealaakso 1987; ³Reynolds 1997; ⁴Loke 1999b)

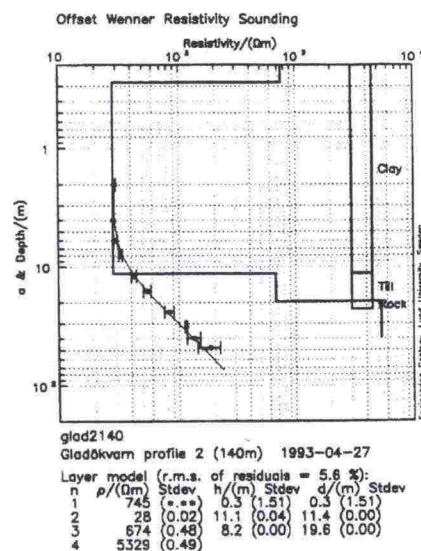
Materiaali	Ominaisvastus [Ωm]
Gabbro, vulkaniitit, kvartsiitti ¹	10 000 – 40 000
Graniitti, gneissi ¹	8000 – 20 000
Liuskeet, fylliitti, kalkkikivi ¹	2000 – 8000
Rapautunut tai ruhjeinen kallio (veden kyllästämä) ¹	200 – 2000
Savikivi, hiekkakivi ¹	30 – 500
Moreeni ²	
- kuiva	1000 - 10 000
- veden kyllästämä	500 – 2000
Sora ²	
- kuiva	10 000 - 30 000
- veden kyllästämä	1000 - 1500
Hiekka ²	
- kuiva	1000 - 3000
- veden kyllästämä	300 - 2000
Siltti ²	40 - 200
Savi ²	25 - 70
Sulfidisavi, -siltti ¹	2 - 50
Muta ²	80 - 150
Turve ²	100 - 300
Routa ³	1000 - 10 000
Pohjavesi ⁴	10 - 100
Järvi- ja jokivesi ¹	200 - 1000
Merivesi (Suomi) ¹	1 - 10
Rauta ⁴	$9.074 \cdot 10^{-8}$
0.01 M Kaliumkloridi ⁴	0.708
0.01 M Natriumkloridi ⁴	0.843
0.01 M Etikkahappo ⁴	6.13
Ksyleeni ⁴	$6.998 \cdot 10^{16}$

3 SÄHKÖISTEN MITTAUSTEN TEORIAA

3.1 Historiaa

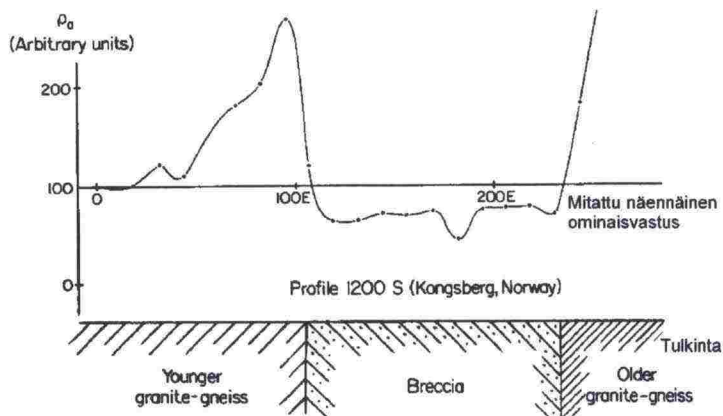
Maavastusmittauksen historia alkaa ranskalaisen Conrad Schlumbergerin vuonna 1912 suorittamista mittauskokeiluista. Vuonna 1915 Schlumberger ja amerikkalainen Wenner ottivat toisistaan tietämättä käyttöön perusjärjestelmäksi muodostuneen nelielektrodijärjestelmän. Seuraavat noin 60 vuotta mittauksia suoritettiin kvantitatiivisesti Schlumbergerin ja Wennerin kehittämällä tavalla (Kunetz 1966). 1950-luvulla Neuvostoliitossa kehitettiin edellä mainittujen elektrodijärjestelmien rinnalle laajasti käytössä oleva dipoli-dipoli-elektrodijärjestelmä (Reynolds 1997).

Maavastusmittauksia on perinteisesti suoritettu joko profilointina tai luotauksena. Maavastusluotauksessa tutkitaan ominaisvastuksen vaihtelua syvyyden funktiona. Siinä tehdään useita mittauksia samalla keskipisteellä, systemaattisesti vaihtuvilla virtaelektrodiväleillä. Maavastusluotausten tulokset on normaalisti tulostettu log-log -kuvaajina (kuva 2). Mittausaineiston tulkinnaissa maankamaran on oletettu koostuvan horisontaalisista kerroksista (Zohdy 1989). Tässä tapauksessa maankamaran ominaisvastus muuttuu vain syvyysuunnassa. Tuloksiksi tällaisten mallien tulkinnaissa on saatu yksiulotteinen kerrosmalli maaperän rakenteesta. Vaikka luotaustuloksista saatu malli on yksiulotteinen, maavastusluotauksen avulla voidaan saada luotettava malli yksinkertaisista rakenteista, kuten pohjaveden pinnasta (Loke 1999b).



Kuva 2. Esimerkki maavastusluotaustulosten tulkinnaista. Pystyakselilla on syvyys ja vaak-akselilla on ominaisvastus. Kuvaan on lisätty myös mallinnuksen tulokset ja tulkittu 1-ulotteinen malli. (Dahlin 1996.)

Toinen perinteinen mittausmenetelmä on maavastusprofilointi, jossa elektrodia siirretään mittauslinjalla samoilla elektrodiväleillä ja ominaisvastuksen vaihtelua mitataan linjan kulun suunnassa. Profiloinnilla saadaan tietoa ominaisvastuksen lateraalisista muutoksista maankamarassa (kuva 3), mutta menetelmä ei anna tietoa ominaisvastuksen vertikaalisista muutoksista. Profilointitulosten tulkinta on pääasiassa kvalitatiivista. (Loke 1999b.)



Kuva 3. Esimerkki kivilajin vaihtumisen ilmenemisestä maavastusprofilointituloksessa. Muokattu Lognin (1954) kuvasta.

Edellisistä maavastusmenetelmistä on kehitetty monielektrodimenetelmä, jolla näennäistä ominaisvastusta voidaan mitata samalla linjalla usealla eri elektrodietäisyydellä. Menetelmää kutsutaan sähköiseksi monielektrodimitaukseksi tai jatkuvaksi maavastusluotaukseksi (CVES, Continuous Vertical Electrical Sounding). Monielektrodimenetelmällä voidaan suorittaa kaksi- tai kolmiulotteisia mittauksia. (Dahlin 1993; Loke 1999b).

3.2 Sähköisten mittausten fysikaalinen perusta ja mittausperiaatte

Sähköisten mittausten tarkoituksena on määrittää ominaisvastuksen jakautumista maankamarassa suorittamalla mittauksia maanpinnalla. Mittaustuloksista voidaan määrittää tulkinnan avulla maankamaran todellinen ominaisvastus, joka riippuu useista tekijöistä. Sähköisiä mittauksia on käytetty useita vuosikymmeniä hydrogeologisissa ja geoteknisissä tutkimuksissa sekä malminetsinnässä (Loke 1999b).

Sähkönjohtavuus ilmaisee nettovarauksen kyvyn liikkua väliaineessa ulkoisen sähkömotorisen voiman ja siitä syntyvän sähkökentän \bar{E} [V/m] vaikutuksesta. Liikkuvat varaukset muodostavat väliaineeseen sähkövirran I [A], jonka suuruus pinta-alayksikköä kohti on sähkövirran tiheys \bar{J} [A/m²]. Sähkövirran tiheyden ja sähkökentän välisen riippuvuuden ilmaisee Ohmin laki,

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}, \quad (1)$$

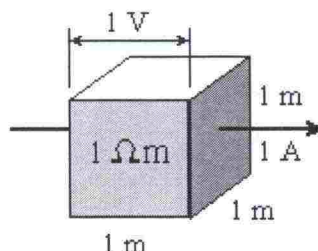
missä σ on sähkönjohtavuus [S/m] (Pernu 1979). Ominaisvastus ρ ($=1/\sigma$) [Ωm] määritellään homogeenisen, isotrooppisen kappaleen vastakkaisten poikkitahojen välisen ohmisen vastuksen R avulla seuraavasti:

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (2)$$

mistä edelleen saadaan

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}, \quad (3)$$

missä L on kappaleen pituus [m] ja S on kappaleen poikkipinta-ala [m²] (kuva 4) (Reynolds 1997).

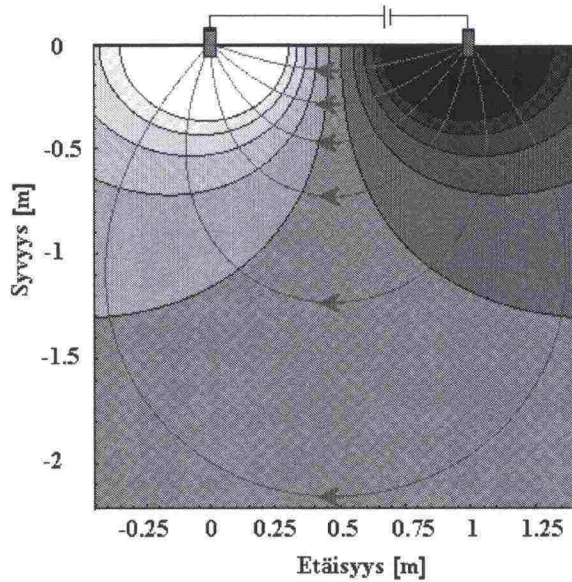


Kuva 4. Ominaisvastuksen määrittelmä. (Oldenburg et al. 1998.)

Maan ominaisvastuksen mittaaminen tapahtuu johtamalla maahan kontrolloitu virta I kahdella maahan asetetulla elektrodilla. Samalla mitataan potentiaaliero ΔU kahdella elektrodilla. Mittauksessa käytetään joko tasavirtaa (DC) tai matalataajuisia vaihtovirtaa (AC). Resistanssi R lasketaan Ohmin lain avulla:

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad [\Omega]. \quad (4)$$

Mitattu potentiaaliero esiintyy ekvipotentiaalien välissä keskimmaisella alueella (kuva 5). Virta I menee kokonaisuudessaan alueen läpi ja siten laskettu ominaisvastus on yhtäsuuri todellisen ominaisvastuksen kanssa niin kauan kuin ekvipotentiaalit eivät muutu. Maan heterogeenisuus (esim. kerroksellisuus) muuttaa varjostetun alueen tilavuutta ja samalla ominaisvastusta (kuva 5). (Jackson 1981.)



Kuva 5. Virrantiheyden ja potentiaalin sama-arvokuvaajat homogeenisessa maankamarassa kahdelle virtapiirin sulkevalle elektrodille. Punaiset viivat ovat virtaviivoja ja mustat viivat ekvipotentiaaliiviivoja. Muokattu Boydin (1996) kuvasta.

Kun maa koostuu johtavuudeltaan erilaisista yksiköistä, kaavasta (3) saatu ominaisvastus on monimutkainen funktio eri yksiköiden todellisista ominaisvastuksista. Tätä suuretta sanotaan näennäiseksi ominaisvastukseksi ja sitä merkitään ρ_a :lla. (Pernu 1979.)

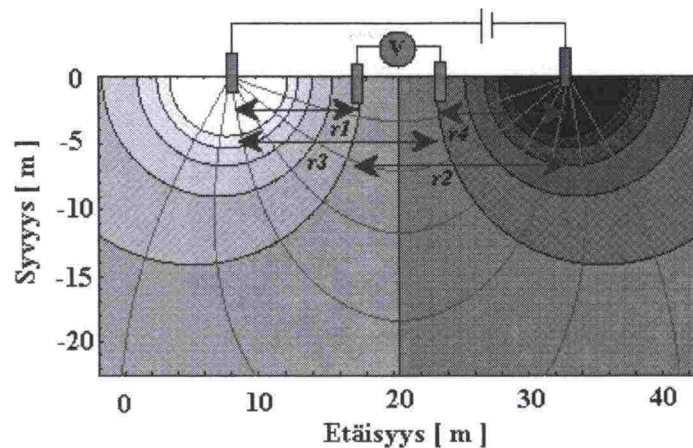
Näennäinen ominaisvastus ρ_a saadaan kertomalla resistanssi geometrisellä kertoimella K:

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (5)$$

missä ΔU on mitattu potentiaaliero ja I on syöttövirta. K [m] on järjestelmästä riippuvainen geometrinen kerroin, jonka arvo lasketaan kaavalla:

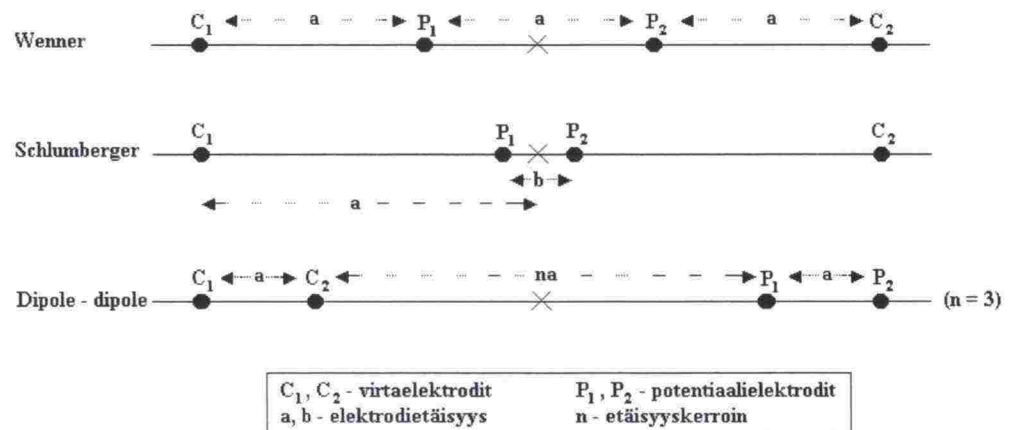
$$K = 2\pi \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1}, \quad (6)$$

missä r_1 , r_2 , r_3 ja r_4 ovat elektrodien väliset etäisyydet (kuva 6). (Peltoniemi 1988.)



Kuva 6. Geometrisen kertoimen K määräytyminen symmetrisessä nelielektrodijärjestelmässä. Muokattu Boydin (1996) kuvasta.

Monielektrodimittauksia voidaan suorittaa useilla erilaisilla elektrodijärjestelmillä. Eri elektrodijärjestelmissä virta- ja potentiaalelektrodit on sijoitettu erilaisiin geometrioihin. Erilaisilla elektrodigeometrioilla voidaan mitata erilaisia rakenteita, joista kerrotaan tarkemmin *kappaleessa 4.6*. Kuva 7 esittää yleisesti käytössä olevia elektrodijärjestelmiä.



Kuva 7. Yleisimmin käytetyt 4-elektrodijärjestelmät. Muokattu Reynoldsin (1997) kuvasta.

Wenner, Schlumberger ja dipoli-dipoli –elektrodijärjestelmät ovat yleisimmin käytössä olevat järjestelmät. Edellä mainittujen järjestelmien lisäksi on kehitetty useita muita elektrodijärjestelmiä, mm. pooli-pooli ja neliö-elektrodijärjestelmät (Reynolds 1997). *Taulukossa 2* on esitetty geometriset kertoimet *kuvan 7* elektrodijärjestelmille.

*Taulukko 2. Näennäisen ominaisvastuksen laskentakaavat geometrisilla ker-
toimilla kuvan 7 elektrodijärjestelmille. Muokattu Reynoldsin
(1997) taulukosta.*

Wenner :	$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta U}{I}$	(7)
Schlumberger:	$\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \left[1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] \frac{\Delta U}{I}; a \geq 5b$	(8)
Dipoli – dipoli:	$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{\Delta U}{I}$	(9)

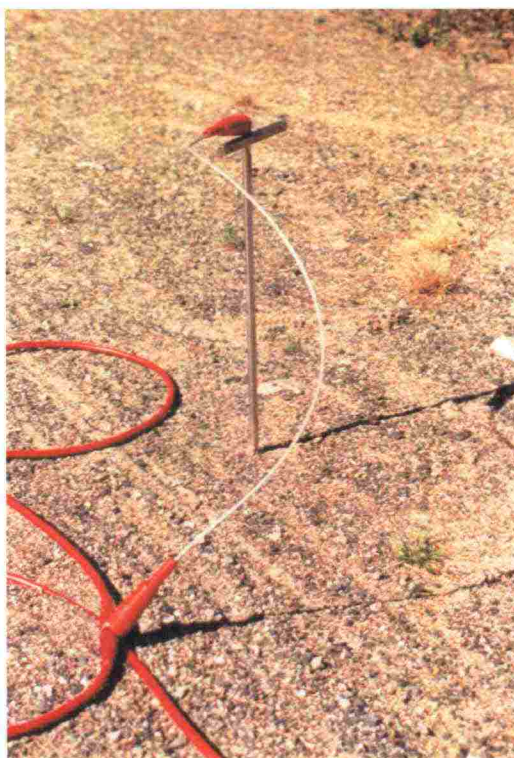
Kuva 8. Mittausperiaate tietokoneohjatuille monielektrodisysteemille. Muokattu Dahlinin (1993) kuvasta

Reynolds (1997) on maininnut useita valmistajia, jotka ovat kehittäneet kaupallisia sähköisiä monielektrodimittauslaitteistoja. Laitteistoja ovat valmistanneet mm. ABEM (LUND Imaging System), Advanced Geosciences Inc. (Sting/Swift) sekä OYO (MacOhm 21 Imaging System). Laitteet eivät eroa periaatteiltaan oleellisesti toisistaan. Laitteistojen erot tulevat esiin mm. mittausnopeudessa, mittauskanavien määrässä sekä elektrodikaapelien pituuksissa. Useimmilla laitteilla voidaan samanaikaisesti suorittaa myös IP (indusoidun polarisaation) -mittaus. ABEM (1999) on valmistanut 4-kanavaisen ominaisvastusmittarin (SAS 4000), jolla voidaan mitata neljää eri potentiaalelektrodiparia yhtäaikaan. Tämä tekniikka on nopea ja käyttökelpoinen erityisesti dipoli-dipoli -järjestelmällä mitattaessa. Sørensen (1996) on kehittänyt liikkuvan monielektrodimenetelmän, jossa elektrodikaapelia vedetään maastoajoneuvolla noin 1.5 km/h nopeudella. Laitteisto suorittaa maavastusmittauksia kaapelia vedettäessä eri elektrodiväleillä ja elektrodijärjestelmillä. Tällä tavoin saadaan mitattua jatkuvaa linjaa noin 10 kilometriä päivässä. Ranskalainen Iris Instruments (1999) on kehittänyt vedettävän ekvatoriaalisen dipoli-dipoli -elektrodijärjestelmän. Elektrodit eivät tarvitse maadoitusta, vaan sähköinen vastus mitataan vaihtovirralla, kapasitiivisen kytkennän avulla.

Tielaitoksen konsultointi omistaa ruotsalaisen ABEM AB:n valmistaman LUND Imaging Systemin[®]-laitteiston (kuva 9). Laitteistoon kuuluu mittausyksikkö eli terrametri SAS300C, joka syöttää virran maahan ja lukee mittauspisteen vastusarvon ja elektrodivalitsin ES464, jota ohjataan HUSKY maastotietokoneella sarjaportin kautta. Elektrodivalitsin ohjaa virran syöttöä ja lukua eri elektrodeille. Kalustoon kuuluu myös neljä elektrodikaapelia á 100 metriä ja 64 teräselektrodia liittiminen (kuva 10). (ABEM 1993a.)



Kuva 9. ABEM LUND Imaging System[®] monielektrodimittauslaitteisto. Vasemmalla yllä on vastusmittari SAS300C, vasemmalla alla elektrodivalitsin ES464 ja oikealla HUSKY kenttätietokone. (Kuva: Silvast, M. 1997.)



Kuva 10. Teräselektrodi on kiinnitetty liittimellä elektrodikaapeliin. (Kuva: Tuisku, P. 1997.)

4.3 Maastomittausten suorittamisen edellytykset

Maastomittauksia vaikeuttavia tekijöitä voivat olla sekä sääolosuhteet että mittausalueen maaperä. Laitteiden osalta rajoituksia ovat alle 0°C:n lämpötila tai sateinen sää. Molemmat tilanteet aiheuttavat virheellisiä mittauksia. Halikossa marraskuussa 1998 saatujen kokemusten mukaan mittaukset tulisi suorittaa maan ollessa sulana. Lisäksi mittauslaitteet eivät toimineet kunnollisesti alle -5°C:n lämpötilassa kunnollisesti. Sateinen sää voi aiheuttaa virheellisiä mittauksia, mikä ilmenee oikosulkuina mittauskaapeleissa. Myös kivinen ja jäinen maanpinta hankaloittavat mittauksia, vaikeuttaen elektrodien asettamista maahan ja galvaanisen kontaktin saamista.

Esivalmisteluina maastoon lähdettäessä täytyy huolehtia siitä, että laitteistojen akut ovat ladatut sekä tarvittava kalusto on mukana eli:

- SAS 300C (+liitântäkaapelit)
- ES 464 (+ liitântäkaapelit)
- Husky kenttätietokone (+ liitântäkaapeli ja lisäakku)
- Vähintään 2 kpl elektrodikaapelia
- Vähintään 41 kpl teräselektrodia
- Vähintään 42 kpl elektrodiliitintä
- Mahdollisesti maastoajoneuvo (esim. mönkijä)

Mittaajien tulee tietää mittauslinjan sijainti kartalla. Linjat tulisi olla valmiiksi paalutettuja ja vaaittuja korkeustiedon liittämiseksi tuloksiin. Lisäksi tulisi tietää alueen päämaalajit alustavasti sekä haluttu tutkimussyvyys. Myös mahdollisia etukäteen tehtyjä kairaustuloksia olisi hyödyllistä tarkastella ennen mittausten aloittamista.

Miehistön suhteen vähimmäisvaatimuksena on yksi laitevastaava ja yksi apumies linjan pystyttämiseen. Laittevastaavan tulee osata luotauslaitteiston käyttö sekä mahdollisten ongelmatilanteiden selvittäminen. Apumiehen tulee osata pystyttää mittauslinja. Hänet voidaan kouluttaa tehtävään myös paikan päällä.

4.4 Mittausten suoritus

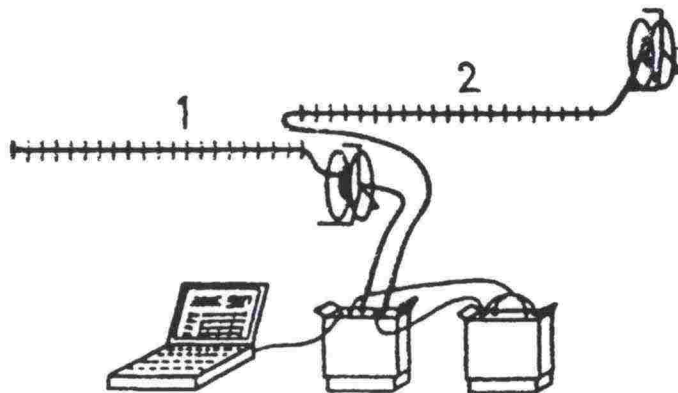
Seuraavaksi esitellään maastomittausten suoritus ABEM:n monielektrodilaitteistolla, Wenner-elektrodijärjestelmällä 5 metrin minimielektrodivälillä (WEN32SX-mittausohjelma) (kuva 11).

Ensimmäiseksi levitetään elektrodikaapelit kokonaisuudessaan linjalle siten, että kaapelin ensimmäinen liitin asetetaan linjan alkupisteeseen. Toisen

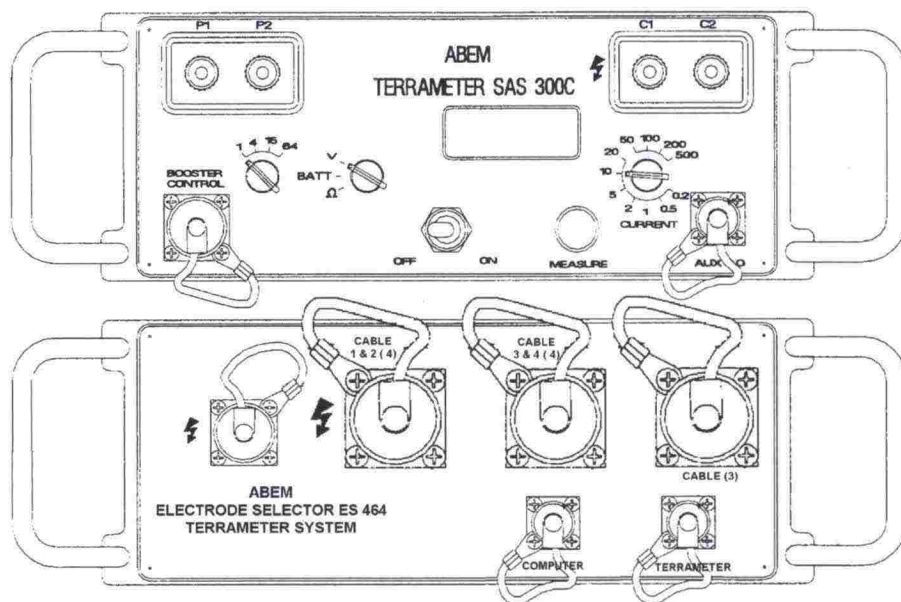
kaapelin ensimmäinen ulostulo asetetaan samalle kohdalle kuin ensimmäisen kaapelin viimeinen ulostulo. Kaapelikelat sijoittuvat tällöin linjan keskipisteeseen ja linjan loppupäähän. Kun kaapelit on levitetty, asetetaan valitulle mittauslinjalle 41 elektrodia 5 metrin välein kaapelin ulosottojen kohdille. Elektrodit kiinnitetään elektrodikaapelin ulosottoihin liittimillä. Ensimmäisen kaapelin 21. ja toisen kaapelin 1. ulosotto liitetään päällekkäin eli kiinnitetään samaan elektrodiin kahdella liittimellä.

Mittauslaitteisto sijoitetaan linjan keskipisteeseen eli 100 metrin päähän alkupisteestä. Ensimmäisen kaapelin liitin liitetään elektrodivalitsimen (ES464) liitimeen cable 1&2 ja toisen kaapelin liitin liitimeen cable 3&4 (ks. kuva 12). Terrametri ja elektrodivalitsin liitetään yhteen kahdella eri johdolla eli aux -johdolla ja virtajohdolla. Aux-johto liitetään terrametrin aux-liittimestä elektrodivalitsimen terrameter-liittimeen. Virtajohdossa on 4 liittintä C1, C2 (punaiset) ja P1, P2 (mustat), jotka liitetään terrametriin. Johdon toinen pää liitetään elektrodivalitsimen vasemmassa reunassa sijaitsevaan liittimeen. Elektrodivalitsin liitetään tietokoneen sarjaporttiin johdolla, joka asetetaan computer liittimestä tietokoneen sarjaporttiin (COM1). Tämän jälkeen asetetaan virta päälle terrametriin, jossa asetukset pitäisi olla Cycles=1, Range=ohm, Current=20mA. Viimeiseksi käynnistetään tietokone ja ERIC-mittausohjelma (ks. Liite 1), joka suorittaa mittaukset. Mittausten aikana voi aiheutua ongelmia ja virheilmoituksia, joita on esitetty liitteillä 2 ja 3.

Mittauslinjan pituutta voidaan jatkaa siirtämällä ensimmäinen tai ylimääräinen elektrodikaapeli toisen jatkoksi. Mittauslaitteisto siirretään myös uuteen keskipisteeseen. Tällä tavoin voidaan jatkaa linjaa haluttuun linjan pituuteen saakka. Jatko-osion mittaaminen kestää noin puolet vähemmän kuin ensimmäisen levityksen mittaaminen, koska jatkolla mitataan vain uudet elektrodijohdistelmät.



Kuva 11. Mittausjärjestely Wen32SX-mittausohjelmaa käytettäessä. (ABEM, 1993a)



Kuva 12. Kaavio mittauslaitteiden liittimistä. Yllä Terrametri, alla elektrodivältsin. Muokattu ABEMin (1993b) kuvasta.

4.5 Mittausnopeus ja resoluutio

Mittausnopeus on vakio kaikilla elektrodiväleillä. Mittauslinjan pituus / työvuoro riippuu käytettävästä elektrodivälistä ja mittaussyvyydestä. Periaatteena on, että mitä syvemältä tietoa halutaan, sitä pitempi linja voidaan kerralla mitata. Taulukossa 3 nähdään elektrodivälin vaikutus elektrodileivityksen pituuteen ja syvyyssulottuvuuteen. Syvyyssulottuvuuden kasvattamisen kustannuksella mittauksen resoluutio kärsii, mutta varsinkin tehtäessä alueellisia tutkimuksia kannattaa mittaukset tehdä pitkällä elektrodileivityksellä.

Mittausnopeutta voidaan havainnollistaa seuraavalla esimerkillä: kun käytetään 5 metrin elektrodiväliä, levityksen pituus on 200 metriä ja linjan mittaus kestää 1h 10min ja syvyyssulottuvuudeksi saadaan 30 metriä. Kun taas käytetään puolta pienempää elektrodiväliä eli 2.5 metriä, yhden levityksen pituudeksi tulee 100 metriä ja syvyyssulottuvuudeksi saadaan 15 metriä. Linjan mittaus kestää tällöin 1h 10 min. Kun linjaa jatketaan 200 metrin (=100m + 50m + 50m) pituiseksi, mittaus kestää 1h 10min + 40 min + 40 min = 2h 30 min.

Mittauksen vertikaalista ja horisontaalista resoluutiota voidaan säätää muuttamalla elektrodiväliä. Wenner-elektrodijärjestelmällä mitattaessa menetelmän horisontaalisena resoluutiona on käytetty elektrodiväli. Vertikaalinen resoluutio saadaan jakamalla käytetty elektrodiväli kahdella. Esimerkiksi käyttämällä kahden metrin minimielektrodiväliä, saadaan horisontaaliseksi erottelukyvynä kaksi metriä ja vertikaaliseksi erottelukyvynä yksi metri. Re-

soluutio riippuu myös ominaisvastuksen vertikaalisista ja horisontaalisista muutoksista. (Reynolds 1997.)

Elektrodiväli voi vaihdella 0.5 metristä 5 metriin (10 metriin jos käytetään 4 elektrodikaapelia). Linjan pituus vaihtelee tällöin 20 metristä 200 metriin ja syvyyssulottuvuus 3 metristä 30 metriin. Linjan pituus on $40 \times$ käytetty elektrodiväli. Syvyyssulottuvuus on 15% linjan pituudesta. Maksimisyyvyyssulottuvuus ABEM:n laitteistolle on 60 metriä, joka saavutetaan käyttämällä neljää elektrodikaapelia. Tällöin kuitenkin täytyy käyttää virran syötön vahvistinta eli boosteria, jonka avulla virran syötön tasoa saadaan kasvatettua 10-kertaiseksi. ABEM:n monielektrodikalustolla voidaan mitata Wenner-, pooli-pooli- ja neliö-elektrodijärjestelmillä käyttämällä ERIC -mittausohjelmaa. Laitteistolle voidaan myös ohjelmoida muita elektrodijärjestelmiä. (ABEM 1993a.)

Taulukko 3. Käytetty elektrodiväli, elektrodilevityksen kokonaispituus ja syvyyssulottuvuus Wenner-järjestelmälle. (Silvast, 1999.)

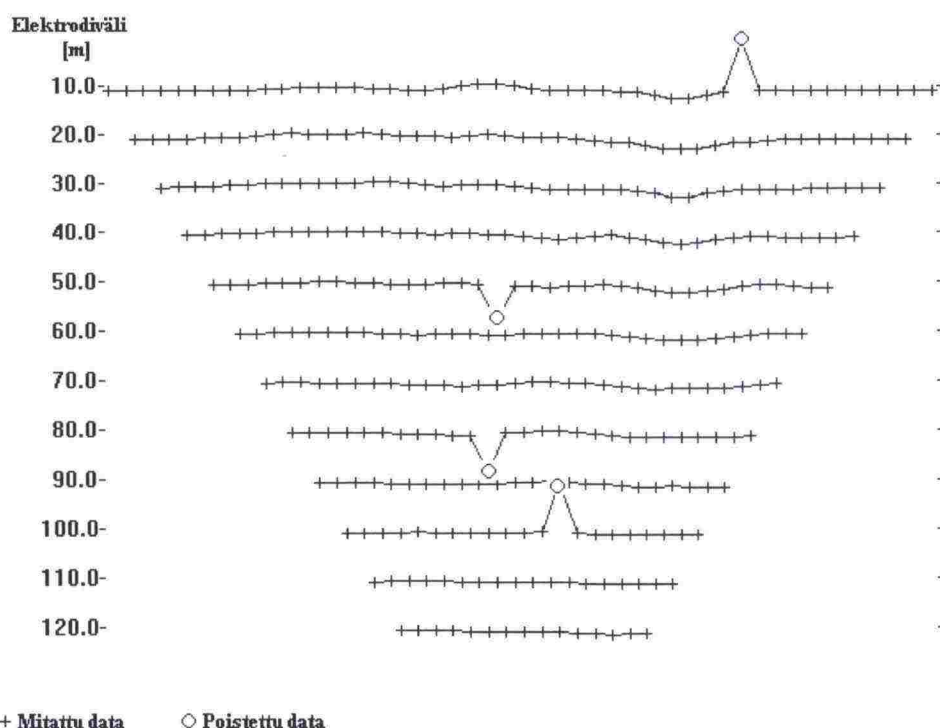
Elektrodiväli [m]	Levityksen pituus [m]	Syvyyssulottuvuus [m]
0.5	20	~3
1	40	~6
2	80	~12
3	120	~18
4	160	~24
5	200	~30
10	400	~60

4.6 Mittaustulosten esikäsittely

Maastomittausten suorittamisen jälkeen voidaan mittausaineisto tarkastaa kenttätietokoneella ABEM:n ERIGRAPH -ohjelmalla. Ohjelman avulla voidaan mittausaineistoa tarkastella kvalitatiivisesti näennäisleikkauksena. Ohjelmalla voidaan tarkastaa mittausten onnistuminen jo kentällä. ERIGRAPH -ohjelma käynnistetään HUSKYSSA komennolla c:>erigraph. Tämän jälkeen valitaan haluttu .dat tiedosto, josta halutaan nähdä näennäisleikkaus. Kun halutaan nähdä mittausaineiston näennäisleikkaus (engl. pseudosection) painetaan <P>. Kuvien ominaisvastusrajoja voidaan muuttaa painamalla <R>, ja asettamalla pienin ominaisvastusarvo ja ominaisvastusalueiden lukumäärä. (ABEM 1993a.)

Kun mittaukset on suoritettu onnistuneesti, niin mittausaineisto siirretään pöytätietokoneeseen ja tulokset esikäsitellään tulkintaohjelmalla. Ensimmäiseksi .dat-tulostiedostot siirretään siirtokaapelin tai siirrettävän PCMCIA-kovalevyn avulla kenttätietokoneesta pöytätietokoneeseen. Tämän jälkeen .dat -tiedosto ajetaan RES2DINV -inversio-ohjelmaan. Ohjelman editointi-

toiminnon avulla tiedostosta voidaan poistaa häiriölliset, selvästi mittaussai-
neiston trendistä poikkeavat datapisteet (kuva 13). Toiminnon avulla mitattu
data esitetään profiileina eri virtaelektrodiväleillä. Virheellisten mittauspistei-
den ρ_a -arvot poikkeavat yleensä selvästi viereisten pisteiden arvoista. Vir-
heelliset mittaustulokset voivat johtua mm. huonosti maadoitetuista elektro-
deista tai oikosuluista ja ne voivat aiheuttaa virheellisiä inversiomalleja.
(ABEM 1993a; Loke 1999a.)



Kuva 13. Esimerkki mittaussaineistosta, jossa on virheellisiä tuloksia. Muokattu Loken (1999a) kuvasta.

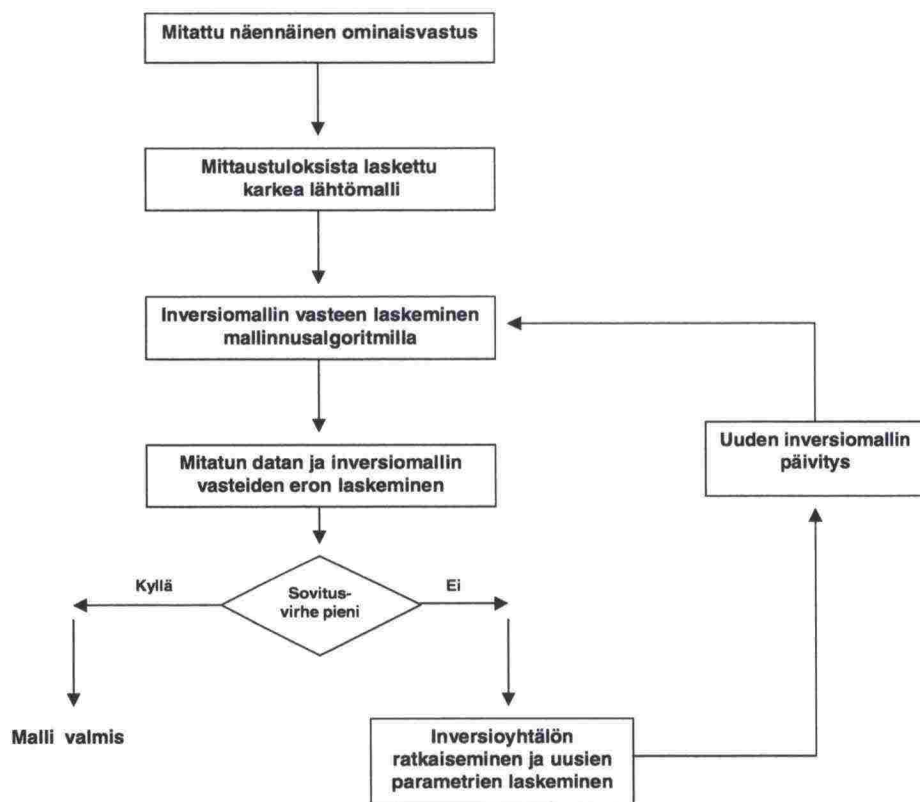
4.7 Mittaustulosten esittäminen

Ensimmäinen vaihe mittaustulosten esittämisessä on näennäisleikkauksen konstruointi. Näennäisleikkauksen avulla mittaustuloksia voidaan tarkastella kvalitatiivisesti. Näennäisleikkaus eli pseudosektio rakentuu siten, että mittaustulokset on tulostettu kuvaajaan, jossa vaaka-akselina on linjan pituusakseli ja pystyakselina elektrodiväli. Mittaustulos kuvataan elektrodijärjestelmän keskipisteen ja elektrodietäisyyden määräämän syvyyssuolottuvuuden kohdalle (kuva 14). Vastaavilla näennäisillä ominaisvastuksilla piirretään sama-arvoesitys, josta nähdään näennäisen ominaisvastuksen vaihtelu linjalla. Mitatut arvot ovat näennäisiä arvoja suuruuden, syvyyden ja sijainnin suhteen. Tästä johtuen näennäisleikkaus kuvaa vain kvalitatiivisesti mitattujen näennäisten ominaisvastusarvojen muutoksia mittauslinjalla. (Dahlin 1993; Barker & Moore 1998.)

Kuvassa 14 havainnollistetaan näennäisleikkauksen rakentuminen Wenner –elektrodijärjestelmää käytettäessä. Linjalla on 20 elektrodia, joiden välinen etäisyys on a . Ensimmäiseksi suoritetaan kaikki mahdolliset mittaukset elektrodietäisyyden ollessa $1a$. Ensimmäisessä mittauksessa käytetään elektrodeja 1 (C1), 2 (P1), 3 (P2) ja 4 (C2). Toisessa mittauksessa käytetään elektrodeja 2, 3, 4 ja 5. Mittauksia jatketaan samalla tavalla, kunnes mittausta on suoritettu elektrodeilla 17, 18, 19 ja 20 viimeisessä mittauksessa. Kun linja on mitattu $1a$:n elektrodivälillä, siirytään mittaamaan elektrodivälillä $2a$. Mittaukset etenevät samaan tapaan kuin edellä on kuvattu. Mittauksia jatketaan samaan tapaan elektrodiväleille $3a$, $4a$, $5a$ ja $6a$. Näin saadaan mitattua kaksikulotteinen profiili maankamaran rakenteesta mittauslinjalla. (Loke 1999b.)

kua profiililla voidaan seurata. Ilman referenssejä geologinen tulkinta vaikeutuu, sillä monien maalajien johtavuusarvot menevät päällekkäin (taulukko 1). (Dahlin 1997.)

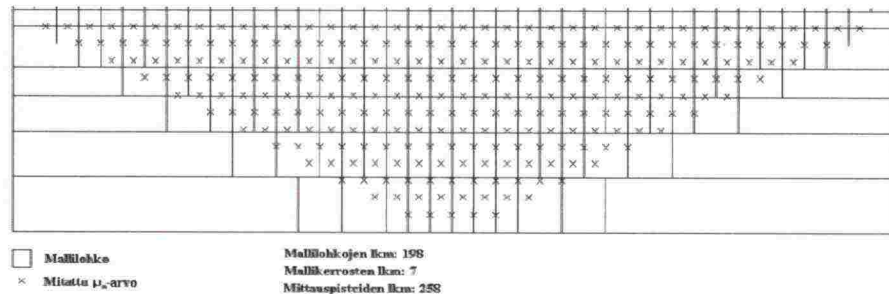
Mittausaineistoa voidaan tarkastella kvalitatiivisesti jo kenttätietokoneella mutta tarkempaa tulkintaa varten mittausaineisto siirretään kenttätietokoneesta työasemalle tai PC:lle, jossa niitä voidaan käsitellä erilaisilla tulkinta-ohjelmilla. Mittausaineistolle tehdään yleensä kaksiulotteinen tulkinta, jossa mallin laskennassa voidaan käyttää esimerkiksi elementti- tai erotusosamääräalgoritmeja. Kuvassa 15 esitetään inversioalgoritmin toiminta. (Dahlin 1994.)



Kuva 15. Inversioalgoritmin toiminta vuokaaviona. Muokattu Narayan et al. (1994) kuvasta.

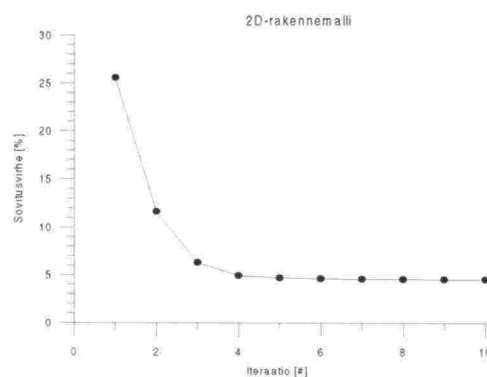
Tielaitoksen mittauksien tuloksinassa on käytetty inversiomallien laske-
misessa RES2DINV -ohjelmaa (Loke 1999a). Ohjelman avulla ρ_a -
mittausaineistosta voidaan laskea inversioalgoritmilla malli, joka aiheuttaa
mitatut tulokset. Ohjelma muodostaa automaattisesti tai käyttäjän asetuksi-
en mukaan mallinnusverkon, johon mittauksien tulokset sijoitetaan (kuva 16).
Algoritmi käyttää mallinnusohjelmaa, joka laskee mallin vasteen ja inver-
siorutiinia, joka perustuu epälineaariseen optimointitekniikkaan. Ohjelmassa
on useita inversio-optioita mm. Occam (deGroot-Hedlin & Constable 1990),

Marquardt-Levenberg (Inman 1975) ja robusti inversio (Claerbout & Muir 1973).



Kuva 16. Mittaustulosten sovitus mallilohkoihin RES2DINV-ohjelmassa. Muokattu Loken (1999) kuvasta.

Inversioalgoritmi konstruoi automaattisesti kaksiulotteisen mallin jakamalla maankamaran useaan suorakulmaiseen lohkoon (kuva 16). Algoritmin tarkoituksena on määrittää lohkojen ominaisvastukset siten, että niiden vaste tuottaa mittausaineistoa vastaavan tuloksen. Optimointimenetelmä yrittää iteroimalla minimoida laskettujen ja mitattujen näennäisten ominaisvastusarvojen eroa. Tämä tapahtuu varioimalla mallilohkojen ominaisvastuksia. Edellisten ero esitetään sovitusvirheenä [%] (kuva 17). Pienin sovitusvirhe ei kuitenkaan aina tuota geologisesti parasta mallia. Mallissa voi tällöin ilmetä suuria ja epärealistisia ominaisvastusarvoja. Parasta olisi valita lopulliseksi malliksi sellainen malli, jonka sovitusvirhe on tasoittunut tietyllä tasolla. Tämä ilmenee yleensä 3-5 iteraation jälkeen. (Lines & Treitel 1984; Loke 1996a.)

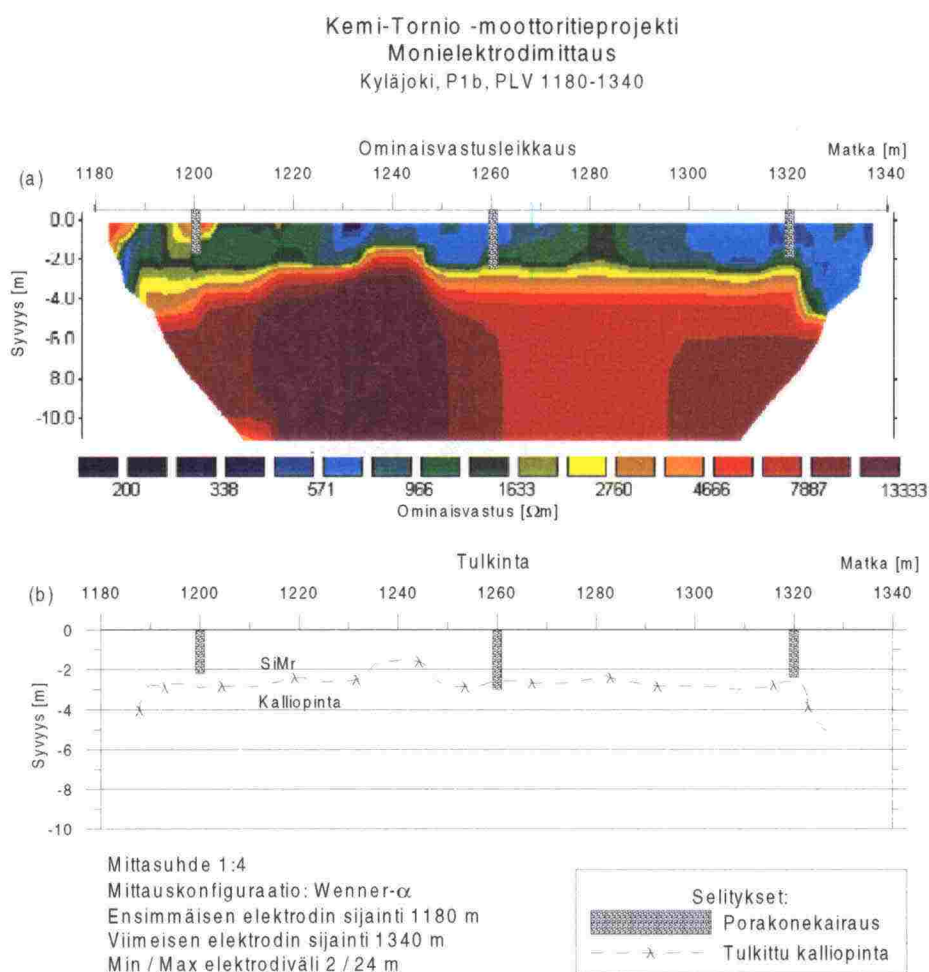


Kuva 17. Sovitusvirheen suppeneminen kaksiulotteiselle rakennemallille. (Silvast, 1999.)

Tulkintakuviissa pystyakselilla on korkeus merenpinnasta tai syvyys maanpinnasta ja vaakakselilla on linjan pituussuunta. Tulkintakuvan alapuolella olevassa palkissa on merkitty ominaisvastusrajat. Mitä pienempi on ominaisvastus, sitä suurempi on maakerroksen johtavuus. Kuvissa eri ominaisvastusarvopinnat on merkitty eri väreillä. Kylmät värit (sininen) kuvassa kuvaavat pientä ominaisvastusta (suuri sähkönjohtavuus) ja värin muuttu-

essa lämpimämmäksi (punainen) ominaisvastus suurenee (pieni sähkönjohtavuus) (kuva 18). Tulkintatuloksiin voidaan liittää myös referenssikairauksien loppusyvyydet sekä maaston topografia.

Tulosten tulkinta on riippuvainen mittauslinjalta saatavasta referenssitiedosta. Referensseinä voidaan käyttää esimerkiksi kairaustietoja tai seismisiä luotauksia. Referenssimittauksen maalajitietojen avulla voidaan tulosten johtavuuskerrokset sitoa todellisiin maakerroksiin ja kerrosten kulkua profiililla voidaan seurata. Ilman referenssejä tulkinta vaikeutuu, sillä monien maalajien ominaisvastusarvot menevät päällekkäin (taulukko 1).



Kuva 18. Monielektrodimittauksen tulokset Kemi-Tornio -moottoritieprojektilta. (a) inversiolla saatu ominaisvastusleikkaus (inversiomalli), johon liitetty maaperäkairauksista saatu kalliopinnan syvyys. (b) tulkinta, johon on tulkittu kalliopinnan kulku tutkimuslinjalla.

4.9 Eri elektrodijärjestelmien vertailua

Eri elektrodijärjestelmillä on etuja ja haittoja toisiinsa nähden verrattaessa mm. niiden horisontaalista ja vertikaalista resoluutiota sekä mittauksen suorittamista. Mittausjärjestelmän valintaan vaikuttavat edellä mainitut syyt sekä

linjan pituuden ja järjestelmän syvyysulottuvuuden aiheuttamat rajoitukset (Reynolds 1997). Lisäksi eri elektrodijärjestelmillä on erilaiset signaali-häiriösuhteet (Loke 1999b). *Taulukossa 4* vertaillaan eri elektrodijärjestelmien erottelukykyä ja herkkyyttä erilaisille rakenteille.

Taulukko 4. Eri elektrodijärjestelmien vertailua (+ huono, ++ kohtalainen, +++ hyvä). (¹Reynolds 1997; ²Barker & Moore 1998; ³Loke 1999b)

Kriteeri	Wenner	Schlumberger	Dipoli-dipoli
Vaakarakenteisen erottelukyky ¹	+++	++	+
Pystyrakenteiden erottelukyky ³	+	++	+++
Syvyysulottuvuus ¹	+	++	+++
Herkkyys poikittaisille epähomogeenisuuksille ¹	Korkea	Kohtuullinen	Kohtuullinen
Herkkyys pinnanläheisille epähomogeenisuuksille ²	Kohtuullinen	Kohtuullinen	Korkea

Taulukosta 4 nähdään että eri elektrodijärjestelmillä on eroja toisiinsa nähden. Joissakin tapauksissa, kuten kapeiden ruhjeiden paikallistamisessa, dipoli-dipoli -järjestelmä on Wenner -järjestelmää tehokkaampi (Zimmer 1999). Sen avulla pystyt rakenteet voidaan erotella paremmin. Dipoli-dipoli -elektrodijärjestelmän huonoiksi puoliksi Reynolds (1997) on maininnut huonon vertikaalisen erottelukyvyn verrattuna Wenner -elektrodijärjestelmään. Toisaalta dipoli-dipoli -järjestelmällä on parempi syvyysulottuvuus. Barker & Moore (1998) suosittelevat Wenner -järjestelmän käyttöä tutkittaessa horisontaalisia rakenteita ja eri rakennekerroksien paksuuksia. Dipoli-dipoli -elektrodijärjestelmä voi aiheuttaa tuloksiin häiriöitä, koska se on herkkä pinnanläheisille pystyrakenteille.

Reynoldsin (1997) mukaan eri elektrodijärjestelmillä on syvyysulottuvuus, joka on verrannollinen mittauksessa käytettyyn elektrodietäisyyteen. Mm. Roy & Apparao (1971), Edwards (1977) ja Barker (1989) ovat määrittäneet tutkimussyvyyskäyriä eri elektrodijärjestelmille. Tutkimussyvyys perustuu sähkövirrantiheysjakumaan, joka vaikuttaa eniten maanpinnalla havaittavaan potentiaalieroon. Homogeenisessa maassa syvyysulottuvuudeksi määritetään tavallisesti se syvyys, jossa sähkövirrantiheys on vähintään 10% maanpinnalla havaitusta virrantiheydestä. Syvyysulottuvuus riippuu käytetystä elektrodijärjestelmästä ja elektrodien välisestä etäisyydestä. Elektrodijärjestelmien keskimääräisiä syvyysulottuvuuksia voidaan laskea syvyysulottuvuuskertoimien avulla (*taulukko 5*). Dahlin & Loke (1998) ovat tutkineet monielektrodijärjestelmän mittaustiheyden vaikutusta inversiomallin tarkkuuteen Wenner-järjestelmällä.

Taulukko 5. Wenner-, Schlumberger- ja dipoli-dipoli -elektrodijärjestelmien syvyysulottuvuuskertoimia (Z_e) homogeeniselle maamallille. Taulukossa a on elektrodietäisyys ja L on elektrodilevityksen pituus. Muokattu Edwardsin (1977) taulukosta.

Elektrodijärjestelmä	n	Z_e/a	Z_e/L
Wenner	-	0.519	0.173
Schlumberger	1	0.52	0.173
	2	0.93	0.186
	3	1.32	0.189
	4	1.71	0.190
	5	2.09	0.190
	6	2.48	0.190
Dipoli-dipoli	1	0.416	0.139
	2	0.697	0.174
	3	0.962	0.192
	4	1.220	0.203
	5	1.476	0.211
	6	1.730	0.216

Taulukossa 5 olevat syvyysulottuvuuskertoimet on laskettu homogeeniselle maamallille, joten ne ovat vain suuntaa antavia maastomittauksia suunniteltaessa. Suuret ominaisvastuskontrastit maanpinnan läheisyydessä voivat vaikuttaa syvyysulottuvuuteen. Hyvin johtava kappale lähellä maanpintaa voi "varjostaa" alla olevia kerroksia ja vaikeuttaa kerrosten ominaisvastusten määrittämistä. Taulukosta 5 nähdään, että Wenner-elektrodijärjestelmän keskimääräinen tutkimussyvyys on noin 0.5 kertaa elektrodiväli. Wenner-järjestelmällä on kohtalainen syvyysulottuvuus verrattuna muihin elektrodijärjestelmiin. Schlumberger-järjestelmän keskimääräinen tutkimussyvyys on noin 10% suurempi samalla virtaelektrodietäisyydellä ($C1$, $C2$). Dipoli-dipoli-järjestelmän keskimääräinen tutkimussyvyys riippuu dipolin pituudesta sekä etäisyyskertoimesta n . (Loke 1999b)

Syvyysulottuvuuden lisäksi eri elektrodijärjestelmillä on eroja niiden kyvyssä havaita ominaisvastuksen pysty- ja vaakavaihteluja. Mitattavan potentiaalieron vaimeneminen etäisyyden suhteen vaihtelee eri elektrodijärjestelmillä. Griffiths & Barker (1993) toteavat Wenner-järjestelmällä olevan etuja verrattaessa sitä muihin elektrodijärjestelmiin. Wenner-järjestelmä ei ole herkkä pinnanläheisille ominaisvastuksen vaihteluille. Dipoli-dipoli -järjestelmässä nämä em. vaihtelut voivat aiheuttaa mittaustulosten vääristymistä näennäisleikkauksessa. Loken (1999b) mukaan signaalin voimakkuus on kään-

teisesti verrannollinen geometriseen kertoimeen (taulukko 2). Wenner-järjestelmällä geometrinen kerroin on $2\pi a$, joka on pienempi kuin muilla järjestelmillä. Wenner-järjestelmällä on näin ollen suurin signaali/kohina - suhde. Schlumberger-järjestelmällä signaali/kohina-suhde on huonompi kuin Wenner-järjestelmällä, mutta parempi kuin dipoli-dipoli -elektrodijärjestelmällä. Dipoli-dipoli -järjestelmässä virta vaimenee $1/r^3$, mikä aiheuttaa ongelmia pitkillä elektrodiväleillä tarkkojen mittaustulosten saamisessa (Pernu 1979). Hyvä signaali/kohina -suhde on tärkeä mitattaessa alueilla, joilla on suuri taustakohina (Loke 1999b).

Tielaitoksen pehmeikkötutkimuksissa Wenner-järjestelmä on sopivin menetelmä vaakarakenteiden paksuuksien ja rakenteen tutkimiseen. Wenner-järjestelmällä saadaan maakerrosten paksuudet ja sähköiset ominaisuudet mitattua tarkasti. Yleisesti kannattaa käyttää 5 metrin elektrodiväliä ja 200 metrin elektrodilevitystä mitattaessa kerroksia joiden paksuudet ovat 2-10 metriä. Tällöin järjestelmän syvyysulottuvuus on maksimissaan noin 30 metriä ja mittaustarkkuus on noin $\pm 1\text{m}$, riippuen maaperän rakenteesta. Kun halutaan mitata pinnan lähellä olevia ohuita kerroksia voidaan elektrodiväliä tarvittaessa lyhentää ja vastaavasti mitattaessa suurempia syvyyksiä elektrodiväliä voidaan pidentää. (Silvast 1999.)

4.10 Mittaus- ja tulkintatuloksiin vaikuttavat tekijät

Geofysikaalisessa mittausaineistossa esiintyy yleensä aina häiriöitä. Sähköisten mittausten tuloksiin vaikuttavat kahdenlaiset virheet: satunnaiset ja systemaattiset. Satunnaisia virheitä ovat mm. vaihtelut samalla elektrodietäisyydellä mitattujen tulosten välillä. Nämä vaihtelut voivat johtua esimerkiksi telluurivirroista maassa tai mittauslaitteen tarkkuuden rajallisuudesta. Satunnaista virhettä voidaan pienentää tekemällä samalla elektrodivälillä useampi mittaus peräkkäin. Tuloksille voidaan tehdä tilastollisia analyysejä, esimerkiksi keskiarvopoikkeama, joita voidaan käyttää tulosten epävarmuuden arvioinnissa. Mittauksia toistettaessa tulokset voidaan myös pinota, jolloin tulosten virheet keskiarvoistuvat. Häiriöiden mahdollisuus mittausaineistossa täytyy ottaa huomioon, jotta ne eivät peittäisi haluttua informaatiota. (Oldenburg et al. 1998; Basokur 1999.)

Systemaattiset virheet voivat aiheutua mm. mittaussysteemin virheellisestä kalibroinnista, elektrodien virheellisestä sijoituksesta, huonosta kontaktista elektrodin ja maan välillä sekä kaapeleiden virheellisestä kytkennästä. Systemaattisia virheitä on vaikea poistaa tilastollisin analyysein. Jos virheen aiheuttaja selvitetään, se voidaan kuitenkin suhteellisen helposti suodattaa pois aineistosta. Edellä mainitut virheet aiheuttavat virheellisiä ja vääristyneitä malleja. Hyvän mallin saaminen vaatii hyvää aineistoa. Yksi tavallinen ongelma datan prosessoinnissa ovat virheelliset mittaustulokset. Normaalialue

pienemmät tai suuremmat näennäiset ominaisvastusarvot tulisi sen vuoksi tarkistaa ennen tulkinnan aloittamista. (Loke 1999a; Basokur 1999.)

Monenlaiset geologiset rakenteet voivat aiheuttaa samanlaisen vasteen mittaustuloksiin. Tuloksia tulkittaessa saadaan useita mahdollisia rakenne-malleja, jotka voisivat aiheuttaa mitatut tulokset. Mallien monikäsitteisyyden aiheuttajia ovat esimerkiksi ekvivalenssi ja peittyvyys. Nämä erikoistilanteet huonontavat tulkintatulosten luokituskykyä. Ekvivalenssi ilmenee tapauksessa, jossa kerros i poikkeaa ympäristöstään paljon paremmin tai paljon heikommin johtavana. Tällöin saadaan tulkinnalla vain osamäärän h_i/ρ_i tai tulon $\rho_i h_i$ arvo. Kerroksen ominaisvastus ρ_i ja kerrospaksuus h_i voivat vaihdella laajoissa rajoissa ilman, että mittaustulos havaittavasti muuttuu, jos osamäärän h_i/ρ_i tai tulon $\rho_i h_i$ arvo säilyy vakiona. Peittyvyys aiheutuu kolmi-kerrosrakenteessa tilanteesta, jossa kerrosten ominaisvastus kasvaa ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$) tai vastaavasti pienenee ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) syvemmälle mentäessä. Tällöin välikerroksella ρ_2 täytyy olla jokin minimipaksuus h_2 , jotta se näkyisi mittaustuloksissa. Ekvivalenssi- ja peittymisprobleemaa yksiulotteisissa ta-savirtamittauksissa ovat tutkineet esimerkiksi Sharma & Kaikkonen (1999). (Peltoniemi 1988.)

Epätavalliset maaperäolosuhteet voivat aiheuttaa virheellisiä mittaustuloksia. Jos maan pintakerros on hyvin kuiva, virtaa ei ehkä saada syötettyä maahan tarpeeksi. Myös jäänyt maa aiheuttaa samanlaisia ongelmia (Pernu 1992). Tässä tapauksessa sähköinen mittaus ei ole välttämättä paras mahdollinen menetelmä, vaan esimerkiksi maatutka voisi olla parempi vaihtoehto. Toinen samantapainen tilanne on hyvin johtava pintakerros. Tällöin potentiaaliero potentiaalelektrodien välillä voi olla liian pieni, jopa pienempi kuin taustakohina. Signaalin voimakkuutta voidaan parantaa syöttämällä maahan enemmän virtaa ja suorittamalla mittaus uudelleen. Jos tämä ei auta voidaan yrittää muita geofysiikan menetelmiä kuten seismistä refraktioluotausta. (Loke 1999a.)

Kolmiulotteinen geologia voi aiheuttaa rajoituksia tulkintamalleille. Kaksi-ulotteiselle monielektrodimenetelmälle rajoituksena on oletus, jonka mukaan maankamara on kaksiulotteinen. Pitkänomaisten geologisten rakenteiden yli tehtäville mittauksille kyseinen oletus on riittävän hyvä. Jos maankamarassa kuitenkin on huomattavia ominaisvastuseroja kohtisuorassa mittauslinjaan nähden, ts. geologinen rakenne on kolmiulotteinen, tämä voi aiheutua vääristymää saadussa mallissa. Pitemmällä elektrodiväleillä tehtyihin mittauksiin vaikuttavat maankamaran syvemmät osat sekä suuremmalla horisontaalisella etäisyydellä linjasta olevat rakenteet. Tämä efekti on selväpiirteisin, kun mittauslinja on sijoitettu kohtisuoraan lähelle jyrkkää vertikaalikontaktia. Maaston topografialla on myös vaikutusta sähköisten mittausten tuloksiin. Topografia aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin siten, että laakso pienentää ja kukkula suurentaa mitattuja näennäisiä ominaisvastusarvoja (Fox et al.

1980). Topografian aiheuttamat efektit voidaan poistaa suorittamalla mittausaineistolle topografiakorjaus inversiovaiheessa (Loke 1999a).

Inversiomallien tulkinta on riippuvainen mittauslinjalta saatavasta referenssitiedosta. Sähköisten tutkimusten vertailutietoina voidaan käyttää esimerkiksi kairautietoja tai seismisiä luotauksia. Mallin johtavuuskerrokset voidaan sitoa todellisiin maakerroksiin referenssimittausten maalajitietojen avulla ja kerrosten kulkua profiililla voidaan seurata. Ilman referenssejä geologinen tulkinta vaikeutuu, sillä monien maalajien ominaisvastusarvot ovat päällekkäisiä (*taulukko 1*). (Dahlin 1996.)

Käytetyllä elektrodijärjestelmällä on vaikutusta saatavan inversiomallin tarkkuuteen. Elektrodijärjestelmä tulisi valita ongelman mukaisesti siten, että kuhunkin tilanteeseen käytetään parhaiten soveltuvaa järjestelmää. Inversiomallin tulkintaparametreilla on myös vaikutusta mallin tarkkuuteen. Inversiossa käytettävän mallinnusverkon koko vaikuttaa saatavan inversiomallin tarkkuuteen. Mitä tiheämpi mallinnusverkko on sitä tarkempi malli saadaan. Tämä lisää kuitenkin laskenta-aikaa huomattavasti. Myös valitulla inversioalgoritmillä on vaikutusta lopullisen inversiomallin tarkkuuteen. (Sasaki 1992; Narayan et al. 1994; Loke 1999b.)

5 SOVELLUSKOhteITA

5.1 Yleistä

Sähköisiä monielektrodimittauksia (=maavastusluotauksia) on käytetty laajasti erilaisissa sovelluskohteissa. Tielaitoksen kalustolla tehtyjen tutkimusten lisäksi kirjallisuudesta löytyy useita sovelluskohteita, joissa monielektrodimenetelmää on käytetty.

5.2 Tielaitoksen tutkimuksia

Lapin tiepiirissä on tehty sähköisiä monielektrodimittauksia lähinnä pohjatutkimuksissa. Menetelmää on käytetty pehmeikköjen paksuuden ja laadun määrittämiseen, kalliopinnan syvyyden ja laadun määrittämiseen, pohjavedenpinnan määrittämiseen sekä sora-alueiden kartoitukseen (Silvast & Saarenketo 1998). Mittausten laadunvarmistamisessa on käytetty yleensä maaperäkairauksia. Mittauksia on suoritettu vuosien 1997, 1998 ja 1999 aikana. Suurin projekti oli Kemi-Tornio moottoritiehankkeen pehmeikkötutkimukset ja maa-ainestutkimukset kesällä 1997. Menetelmää on käytetty myöhemmin mm. tiehankkeilla Tampereella, Turussa ja Porvoossa sekä kallioperätutkimuksessa Boliden AB:n kaivosalueella Aznalcollarissa, Etelä-Espanjassa syksyllä 1998, yhteistyössä MRM Konsult AB:n kanssa.

5.3 Pohjatutkimukset

Monielektrodimenetelmä on tehokas mittausmenetelmä pohjatutkimuksissa geotekniikan tarpeisiin. Dahlin (1996) on tutkinut monielektrodimenetelmän soveltuvuutta maa-ainestutkimuksiin sekä kalliopinnan topografian kartoittamiseen savi- ja moreenikerrosten alla. Johansson & Dahlin (1996) ovat tutkineet monielektrodimenetelmällä maapadoissa esiintyviä vuotoja. Vuodot voitiin paikallistaa anomalioina, jotka ilmenivät ominaisvastuksen pienemisenä.

5.4 Kallioperätutkimukset

Monielektrodimenetelmän avulla voidaan tutkia myös kallioperän ominaisuuksia. Dahlin et al. (1996) ovat tutkineet kallioperän ruhjeita rautatietunnelin sijoitustutkimuksissa. Zimmerin (1999) tutkimuksessa monielektrodimenetelmää on käytetty veden kyllästämien ruhjeiden tutkimisessa. Tutkimuksessa vertailtiin Wenner- ja dipoli-dipoli -järjestelmien herkkyyttä ruhjeiden paikallistamisessa.

5.5 Pohjavesitutkimukset

Barker & Moore (1998) ovat tutkineet maavastusmenetelmän soveltuvuutta pohjaveden virtauksen seurantatutkimuksissa. Tutkimuksessa maahan syötettiin 40 000 litraa vettä 10 tunnin aikana. Veden imeytymistä maaperään mitattiin tasaisin väliajoin. Näin saatiin mitattua veden vaikutusta ominaisvastukseen ajan suhteen. Dahlin & Owen (1998) ovat käyttäneet monielektrodimenetelmää pohjavesiesiintymien etsimiseen Zimbabweassa. Ominaisvastuksen avulla alueella voitiin rajata pohjavesiesiintymät hydrogeologisia jatkotutkimuksia varten. Monielektrodimenelmä soveltuu hyvin myös makean ja suolaisen pohjaveden kohtausvyöhykkeen paikallistamiseen rannikkoalueilla (Loke 1999b).

5.6 Ympäristötutkimukset

Ympäristötutkimuksissa monielektrodimenetelmää on käytetty laajasti. Kaatopaikkatutkimuksissa mittauksien avulla on voitu selvittää vuotovesien leviämisreittejä ja niiden laajuutta sekä jätepeiton paksuutta (Barker 1992; Reynolds 1995). Bernstone & Dahlin (1996) ovat käyttäneet monielektrodimenetelmää vanhojen kaatopaikkojen pohjarakenteiden vedenpitävyyden selvittämisessä. Lima et al. (1995) ja Barker (1996) ovat tutkineet teollisuuslaitoksen jätealtaan vuotojen leviämistä monielektrodimenetelmällä. Pitkäranta (1998) on tutkinut monielektrodimenetelmällä vanhan öljytynnyripesulan saastuttamaa maaperää. Maaperän oletettiin saastuneen jäteöljyllä, liuottimilla ja muilla orgaanisilla aineilla. Tulosten perusteella indusoidun polarisaatioarvon ja ominaisvastuksen yhteismittauksilla voitiin saastunut maa-alue rajata ja maaperän saastuvuutta arvioida suhteellisen luotettavasti.

5.7 Erikoistutkimukset

Sähköinen monielektrodimenetelmä soveltuu myös erilaisiin erikoistutkimuksiin. Hauck & Vonder Mühl (1999) ovat tutkineet monielektrodimitauksilla ikiroutaesiintymiä Sveitsin ja Italian Alpeilla. Tulosten perusteella menetelmän todettiin soveltuvan hyvin ikiroutaesiintymien kartoittamiseen. Ikiroutaesiintymien paikallistaminen ja luokittelu on tärkeää arvioitaessa maanvyörymien riskejä ilmaston lämpenemisen johdosta. Monielektrodimitauksia on käytetty myös arkeologisissa tutkimuksissa sekä muiden rakennettujen kohteiden paikallistamisessa (Noel & Xu 1991; Nawawi & Loke 1995; Loke 1999a). Mittauksia on tehty myös veden alla merenpohjan sedimenttikerrosten rakenteiden tutkimuksissa (Lagmasson 1998). Mittaukset suoritettiin merenpohjaan asetetun elektrodikaapelin avulla Floridan rannikolla.

Monielektrodikalustoilla voidaan tehdä myös kolmiulotteisia tutkimuksia. Esimerkiksi Sasaki (1994) ja Loke & Barker (1996b) ovat tutkineet kolmiulotteisten sähköisten tutkimusten suorittamista monielektrodilaitteistoilla sekä tulosten tulkintaa ja mallintamista. Kolmiulotteisten tutkimusten avulla saadaan kartoitettua maankamaran johtavuustasoja eri syvyyksiltä. Tasojen perusteella voidaan rakentaa kolmiulotteinen malli maankamaran rakenteesta (Loke 1999b).

5.8 Tulevaisuus

Mittaus- ja tulkintamenetelmien kehittyessä monielektrodilaitteistojen avulla voidaan kerätä nopeasti mittausaineistoa. Tietokoneiden tehojen kasvaessa ja tulkintaohjelmistojen parantuessa myös laskenta-ajat lyhenevät. Uudet innovaatiot mm. liikkuva monielektrodimittaus nopeuttavat tutkimusten suorittamista huomattavasti. Galvaanisen kontaktin korvaaminen vaihtovirralla toimivalla kapasitiivisella kytkennällä on suuri edistysaskel maavastusmittauksissa (Iris Instruments 1999). Tällaisilla laitteistoilla voidaan mitata myös rakenteita, joihin elektrodien asettaminen galvaanisen kontaktin saamiseksi on mahdotonta (esim. betonilattia, asfalttipäällyste jne.).

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Saatujen tulosten perusteella sähköinen monielektrodimenetelmä on käyttökelpoinen menetelmä geologisten rakenteiden tutkimiseen. Menetelmällä voidaan tutkia pehmeikköalueen paksuutta ja ominaisuuksia. Myös muiden maakerrosten paksuudet tutkimuslinjalla voidaan mitata suhteellisen tarkasti. Kairaustiedot ovat tärkeitä tulkintatarkkuuden kannalta. Inversiomallin ominaisvastuksien ja referenssitietojen avulla oikeat ominaisvastuskerrokset voidaan sitoa todellisiin maakerroksiin ja kerrosten paksuuksia linjalla voidaan seurata ominaisvastuspinnan mukaan. Tällöin oikean ominaisvastuskaalan eli ominaisvastuksen sama-arvopintojen valinta inversiomallin tulostuksessa on tärkeää, ettei peitetä haluttua tietoa.

Monielektrodimenetelmän hyvä puoli perinteisiin pohjatutkimusmenetelmiin verrattuna on tulosten kattavuus. Menetelmällä saadaan linjalta jatkuva profiili, toisin kuin esimerkiksi kairaamalla, jolloin linjalta saadaan vain pistetietoa. Tekniikka on myös ympäristöystävällinen. Kemialliset muutokset vaikuttavat sähköisiin ominaisuuksiin, joten saasteita ja suolan kulkeutumista pohjavedessä voidaan tutkia. Menetelmää voidaan käyttää tilanteissa, joissa maan pintakerros on johtava (vrt. maatutka). Lisäksi tuloksiin eivät vaikuta piilokerrokset kuten refraktioseismiikassa. Tasavirtamittaukset eivät myöskään ole niin herkkiä sähkömagneettisille häiriöille kuin sähkömagneettiset menetelmät. Kuitenkin suuren syvyysulottuvuuden saavuttamiseksi tarvitaan pitkiä elektrodileivityksiä.

Huonona puolena ABEM:n LUND -systeemeissä on mittauksen hitaus, mikä rajoittaa mittausten tehokkuutta. Nykyisin on markkinoilla kuitenkin huomattavasti nopeampia monikanavaisia laitteita, joiden avulla mittausaika voi olla vain neljäsosa entisestä. Toisena negatiivisena puolena on vastusmittarin manuaalinen virransäätö. Tämä tarkoittaa sitä, että yhden henkilön täytyy pysytellä mittalaitteen lähistöllä ja säätää virransyöttöä tarpeen mukaan. Tämä on tarpeen etenkin alueilla, joilla on korkeavastuksinen pintamaa. Myös syöttövirran maksimisuuruus (20 mA) peruslaitteistolla voi olla liian pieni joillakin johtavilla alueilla ja pitkillä elektrodiväleillä. Tämä voi aiheuttaa signaali/kohina -suhteen huononemista. Ongelma voidaan kuitenkin ratkaista käyttämällä ABEM:n tehostinta (boosteri), jolla maksimi virransyöttö voidaan kymmenkertaistaa.

Maastomittausten suorittamisessa esille tulleita rajoittavia tekijöitä ovat yleensä olleet vallitsevat olosuhteet. Laitteiden osalta rajoituksia ovat alle -5° C:n lämpötila ja sateinen sää. Molemmat tilanteet aiheuttavat virheellisiä mittaustuloksia. Galvaanisen kontaktin takia elektrodien asettelu voi olla aikaa vievää kuivilla alueilla, kivikoilla tai jäätyneessä maassa. Lisäksi loh-kareisilla alueilla kalliopinnan ja moreenin rajapintaa on vaikea erottaa tul-

kinnassa, kuten muillakin geofysikaalisilla menetelmillä. Mahdollisten häiriöiden syynä voi olla myös johtavien kappaleiden, kuten metalliputkien ja maadoitettujen metalliaitojen, galvaaninen kontakti maahan elektrodien lähistöllä.

Sähköisen monielektrodimenetelmän sovellusalueita on useita, kuten maa-perään joutuneen saasteen leviämisen tutkiminen, pohjavesialueiden koepumppausmittauksien tutkimus, suolaisen ja puhtaan pohjaveden kontaktin kartoittaminen ja kaatopaikkojen kontaminaation kulkeutumisreittien määrittäminen.

7 KIRJALLISUUS

ABEM, 1993a. Instruction manual: Lund imaging system. ABEM Instrument AB, Bromma, Sweden.

ABEM, 1993b. Instruction manual: Terrameter SAS 300C. ABEM Instrument AB, Bromma, Sweden.

Barker, R., 1996. Recent applications of electrical imaging surveys in the United Kingdom. Procs. SAGEEP'96 (Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental), Keystone, Colorado, 1289-1302.

Barker, R. & Moore, J., 1998. The application of time-lapse electrical topography in groundwater studies. The Leading Edge, 17, 1454-1458.

Basokur, A.T., 1999. Automated 1D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct and iterative methods. Geophys. Prosp., 47, 149-177.

Bernstone, C. & Dahlin, T., 1996. 2D Resistivity surveying of old landfills. Procs. 2nd European EEGS Meeting, Nantes, France. 188-191

Boyd, T., 1996, modified 18.7.1999. Geophysical surveying using dc resistivity. [WWW- document].
<www.mines.edu/fs_home/tboyd/gp311/modules/res/main.html>.
(Luettu 6.10.1999)

Claerbout, J.F. & Muir, R., 1973. Robust modeling with erratic data. Geophysics, 38, 826-844.

Dahlin, T., 1993. On the automation of 2D resistivity surveying for engineering and environmental applications. Thesis, Lund university, Lund, 187 s.

Dahlin, T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. First Break, 14, 275 - 283.

Dahlin, T., Bjelm, L. & Svensson, C., 1996. Resistivity pre-investigations for the railway tunnel through Hallandsås, Sweden. Procs. 2nd European EEGS Meeting, Nantes, France, 109-112.

Dahlin, T. & Loke, M.H. 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. J. of Appl. Geophys., 38, 237-249.

Dahlin, T. & Owen, R., 1998. Geophysical investigations of alluvial aquifers in Zimbabwe. Procs. 4th EEGS Meeting, Barcelona, Spain, 151-154.

deGroot-Hedlin, C. & Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. Geophysics, 55, 1613-1624.

Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, 42, 1020-1036.

Griffiths, D.H., Turnbull, J. and Olayinka, A.I., 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array. First Break, 8, 121-129.

Griffiths D.H. & Barker R.D. 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. J. of Appl. Geophys., 29, 211-226.

Hauck, C. & Vonder Mühll D., 1999. Using DC resistivity tomography to detect and characterise mountain permafrost. EAGE 61th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Amsterdam.

Heiskanen, V., 1975. Galvaanisista pienoismallimittauksista sovellettuna latauspotentiaali- (mise-à-la-masse-) menetelmään. Diplomityö. Otoniemi: Teknillinen korkeakoulu, Vuoriteollisuusosasto, 52+34 s.

Inman, J. R., 1975. Resistivity inversion with ridge regression. Geophysics, 40, 798-817.

Iris Instruments, 1999. Corim, Continuous electrical profiling system. [WWW-document]. < www.iris-instruments.com >. (Luettu 6.10.1999)

Jackson, P.D., 1981. Focussed electrical resistivity arrays: some theoretical and practical experiments. Geophys. Prosp., 29, 601-626.

Johansson, S. & Dahlin, T., 1996. Seepage monitoring in an earth embankment dam by repeated resistivity measurements. European Journal of Engineering and Geophysics, 1, 229-247.

Lagmasson, M., 1998, modified 19.9.1999. Marine resistivity survey. [WWW-document]. Advanced Geosciences Inc., < www.agiusa.com/marine.shtml >. (Luettu 6.10.1999).

Lines, L.R. & Treitel, S., 1984. Tutorial: a review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. Geophys. Prosp., 32, 159-186.

- Logn, O., 1954. Mapping nearly vertical discontinuities by earth resistivities. *Geophysics*, 19, 739-760.
- Loke, M.H. & Barker, R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, 44, 131-152.
- Loke, M. H., 1999a. RES2DINV 3.4. Rapid 2D and IP inversion by M.H. Loke. Manual; RES2DINV ver. 3.3 for Windows 3.1, 95 and NT. June 1999. Delivered by Abem Instrument AB, Sweden. 66 pp. + 40 pp.
- Loke, M.H., 1999b. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. [PDF-document]. <www.abem.se/ftp/Loke/2Dnotes.pdf>, 54 s. (Luettu 6.10.1999)
- Narayan, S., Dusseault, M.B. & Nobes, D.C., 1994. Inversion techniques applied to resistivity inverse problems, *Inverse Problems*, 10, 669-686.
- Nawawi, M.N.M. & Loke, M.H., 1995. Mapping voids and other man-made subsurface structures using 2D resistivity imaging technique: 57th Annual Meeting, EAEG, Expanded abstracts, D033.
- Noel, M. & Xu, B., 1991. Archeological investigation by electrical resistivity tomography: a preliminary study. *Geophys. J. Int.*, 107, 95-102.
- Oldenburg, D., Li, Y. & Jones, F. 1998, modified 15.07.1999. Tutorial: Inversion Methodology. [WWW-document]. University of British Columbia, Geophysical Inversion Faculty, < www.geop.ubc.ca/ubcgif/tutorials/invtutorial/index.html >. (Luettu 6.10.1999).
- Peltoniemi, M., 1988. Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo, Espoo, 411 s.
- Pernu, T., 1979. Maa- ja kallioperän tutkiminen tasavirtamittauksilla, erityisesti Suomen oloissa. Lisensiaattitutkimus, Geofysiikan laitos, Oulun yliopisto, 99 s.
- Pernu, T., 1991. Model and field studies of direct current resistivity measurements with the combined (half-Schlumberger) array AMN, MNB. *Acta Universitatis Ouluensis. Series A. Scientiae rerum*, University of Oulu, 77 s.
- Pitkäranta, K., 1998. Saastuneen maa-alueen tutkiminen geofysikaalisin menetelmin. Uudenmaan ympäristökeskuksen monisteita, n:o 32, Helsinki, 89 s.

Roy, A. & Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, 36, 943-959.

Reynolds, J.M., 1995. Environmental geophysics: towards the new millennium. *Geoscientist*, 5, 21-23.

Reynolds, J.M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, Chichester, 796 s.

Saksa, P. & Korkealaakso, J., 1987. Application of geophysical methods in environmental and municipal engineering (theoretical study), VTT tutkimuksia no 505., 124 s.

Sharma, S.P. & Kaikkonen, P., 1999. Appraisal of equivalence and suppression problems in 1D EM and DC measurements using global optimisation and joint inversion. *Geophys. Prosp.*, 47, 219-249.

Silvast, M. & Saarenketo, T., 1997. Uutta tekniikkaa pohjatutkimuksiin, maavastusmittaukset Kemi-Tornio moottoritieprojektilla. *Tierakennussestari*, no 4., 46-48.

Silvast, M., 1999. Sähköisten monielektrodimittausten käyttö maa- ja kallioperätutkimuksissa. Pro gradu -tutkielma. Geofysiikan osasto, Oulun yliopisto, 83 s.

Zimmer, U., 1999. Resistivity inversion in the presence of water saturated fractures. EAGE 61th Conference and Technical Exhibition Extended Abstracts, Amsterdam.

Zohdy, A. A. R., 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54, 245-253.

8 LIITTEET

1. Eric-mittausohjelman käyttö
2. Ongelmatilanteita
3. Terrametrin virheilmoituksia

LIITE 1

ERIC –MITTAUSOHJELMAN KÄYTTÖ

Aluksi siirrytään mittaushakemistoon, johon mittaustulokset tallentuvat:
Ohjelma käynnistetään komennolla **eric**

- Valitaan ylävalikosta **SET-UP**

Vaihdetaan valikosta **measurement par**
max meas. cycles arvoksi 2 (nuoli y/a)
spacing arvoksi käytetty elektrodiväli (=5m)

Muutokset hyväksytään Enterillä. Valikkoon **protocol files** valitaan haluttu mittaussjärjestelmä. Valikko tyhjennetään **Clearilla**. Mittausjärjestelmä valitaan **Add files** – valikosta. Esimerkiksi mitattaessa Wenner-järjestelmällä 2 elektrodikaapelilla, voidaan käyttää Wen32sx -tiedostoa. SET-UPista poistutaan esc:lla.

- Siirrytään ylävalikkoon -> **NEW**

filename? (= mittaustiedoston nimi)
comment? (= esim. linjan nimi ja paaluväli)
x-co-ordinate? (= mittauslaitteiston sijainti)

Kun edelliset tiedot on syötetty, ohjelma suorittaa mittauksen.

- Ohjelma testaa aluksi elektrodien kytkennät, jonka jälkeen ohjelma suorittaa mittauksen. Kun mittausslinja mitattu, ohjelma siirtyy valikkoon, jossa voi valita lopettaako ohjelman vai jatketaanko mittausslinjaa eteenpäin. Jos ei jatketa, mennään **Main menuun ja painetaan Y, kun ohjelma kysyy make .dat file?** Tämän jälkeen lopetetaan ohjelma menemällä **QUIT** –ylävalikkoon. Jos halutaan jatkaa mittausslinjaa valitaan suunta UP tai DOWN. UP tarkoittaa eteenpäin menoa linjalla ja DOWN taaksepäin menoa.

ONGELMATILANTEITA

Ongelma: Elektrodivalitsin ei käynnisty, kun terrametri käynnistetään (terrametri ei piippaa, kun se käynnistetään).

Syy: Akku voi olla tyhjä tai elektrodivalitsimen ja terrametrin välinen kaapeli voi olla viallinen tai väärin kytketty.

Ratkaisu: Tarkista että molempien laitteiden akuissa on virtaa ja niiden väliset kaapelit on oikein kytketty.

Ongelma: Kontaktitestissä ei saada kontaktia elektrodeista

Syy: Kaikilla elektrodeilla on huono kontakti maaperään tai terrametri ei anna signaalia.

Ratkaisu: Tarkista, että elektrodivalitsin ja terrametri toimivat oikein. Tarkista myös kaapeleiden liittimet ja akut. Jos ongelmia vielä on niin yritä parantaa elektrodien maadoitusta ja pienentää syöttövirtaa.

Ongelma: Epävakaita ja mahdollisesti negatiivisia mittaustuloksia.

Syy: Huono elektrodikontakti ja mahdollisesti liian pieni virransyötön taso.

Ratkaisu: Tarkista, että terrametrin virransyöttö on asetettu suurimmalle mahdolliselle tasolle. Jos on tarpeen, elektrodeja voidaan kastella ja yrittää painaa syvemmälle maahan. Elektrodeja voidaan myös asettaa kaksi rinnakkain ja näin saadaan parempi kontakti. Tarkista myös että kaikki liittimet ovat kunnossa ja kiinnitettyjä elektrodikaapeliin.

Ongelma: Negatiivisia, mutta vakaita mittaustuloksia.

Syy: Elektrodikaapelit voivat olla liitetty väärinpäin elektrodivalitsimeen.

Ratkaisu: Tarkista, että kaapelit ovat oikein päin elektrodivalitsimessa.

Ongelma: Epävakaita ja epärealistisia tuloksia

Syy: Virran vähyys elektrodivalitsimessa tai Huskyssa voivat aiheuttaa vääriä mittaustuloksia.

Ratkaisu: Vaihda akut, jos akun jännite laskee.

LIITE 3

TERRAMETRIN VIRHEILMOITUKSIA

Mahdollisia virheilmoituksia voi ilmetä mittauksen aikana ja ne näkyvät terrametrin näytössä. Niitä ovat Error 1, 5 ja 6.

Error 1 tarkoittaa, että syöttövirta on säädetty liian suureksi ja sitä täytyy pienentää. Virheilmoituksesta päästään kun pienennetään virtaa esim. 10 mA:iin ja annetaan ohjelman suorittaa mittaus, kun piste on mitattu syöttövirta voidaan palauttaa 20 mA:iin

Error 5 tarkoittaa, että virtaa ei pystytä syöttämään maahan tarpeeksi, virhe poistuu kun suljetaan terrametrin virta hetkeksi.

Error 6 tarkoittaa äkillistä virran laskua syöttölaitteessa, virhe poistuu kun suljetaan terrametrin virta hetkeksi.

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-577-8
TIEL 3200581